

Article, Published Version

**Hentschel, Bernd**

## **Hydraulische Flussmodelle mit beweglicher Sohle**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102604>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hentschel, Bernd (2007): Hydraulische Flussmodelle mit beweglicher Sohle. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 90. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 25-46.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Hydraulische Flussmodelle mit beweglicher Sohle

DIPL.-ING. BERND HENTSCHEL, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU KARLSRUHE

## 1 Einleitung

In alluvialen Flachlandflüssen bewegt sich an der Sohle beständig Geschiebe (Bild 1). Dabei ist die Menge und Form des Transportes stark abhängig von der Geometrie des Flussbettes. Um die komplexe Wechselwirkung zwischen unterschiedlichen Stromregelungselementen zu untersuchen und zu prognostizieren, betreibt die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) hydraulische Feststofftransportmodelle. Zur naturähnlichen Simulation dieses Geschiebetransportes wird bei den Modellen das Naturgeschiebe durch feinen Sand oder durch ein Ersatzmaterial, zum Beispiel leichtes Kunststoffgranulat, ersetzt. Diese gegenständlichen Modelluntersuchungen werden durch Simulationsrechnungen mit numerischen Modellen ergänzt. Die Mess- und Steuerungstechnik im wasserbaulichen Versuchswesen hat dabei in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, sodass sich daraus neue Anwendungsgebiete ergeben. Die Prognosefähigkeit der Modelle bei der detaillierten Analyse von Stromregelungskonzepten konnte erheblich gesteigert werden. Neue Verfahren der fahrdynamischen Modellierungen von Schiffen in alluvialen Gewässern kommen zu Anwendung. Und nicht zuletzt stellen die umfangreichen und qualitativ hochwertigen Daten aus den Modellen hochwertige Validierungsdaten für numerische Verfahren dar.



Bild 1 : Wandernde Sandbank in der buhngeregelten Elbe bei Hitzacker (El-km 519)

Der Artikel zeigt an Beispielen aus der Praxis die von der BAW bei der Verwendung hydraulischer Geschiebetransportmodelle angewandten Methoden. Zunächst wird die Frage beantwortet, warum trotz Verfügbarkeit von immer mehr Rechenleistung und immer besserer Rechenverfahren weiterhin die Notwendigkeit der gegenständlichen Modellierung von Feststofftransportphänomenen besteht.

Bei der Beschreibung der verwendeten Untersuchungsmethoden wird insbesondere auf die flächige photogrammetrische Erfassung und Analyse der Sohlgeometrie eingegangen. Diese Methode ermöglicht die hochauflösende Vermessung der Modellsohle auch während des Versuchsbetriebes.



Bild 2: Hydraulisches Modell der Oder bei Hohenwutzen (MdL: 1:100, L = 78 m)

Dieser Beitrag beruht im Wesentlichen auf Untersuchungen der BAW, die an zwei hydraulischen Modellen von Elbe und Oder durchgeführt wurden (s. Bild 2 und Tabelle 1). In beiden Fällen handelt es sich um Flachlandflüsse mit einem ausgeprägten Geschiebetransport von Sand und Feinkies in Form von Dünen. Es wurden Untersuchungen zu Unterhaltungs- und Regelungsvarianten durchgeführt [BAW 1994; BAW 2001a; BAW 2001c; Hentschel und Witte 1999].

|                      | Elbe   | Oder  |
|----------------------|--|---|
| Untersuchungsbereich | Elbe - Reststrecke<br>El-km 506,4 bis El-km 512,4                    | Oder Hohenwutzen<br>Od-km 654,7 bis Od-km 662,5 |
| Modellmaßstäbe       | $L_r = 110$ ; $H_r = 40$   | $L_r = 100$ ; $H_r = 40$                        |
| Modelllänge          | ca. 60 m   | ca. 78 m  |
| Naturgeschiebe       | Grobsand / Feinkies<br>$d_m \approx 1,2$ mm                          | Grobsand / Feinkies<br>$d_m \approx 0,9$ mm     |
| Modellgeschiebe      | Polystyrolgranulat, $d_m = 2,1$ mm, $\rho = 1,055$ g/cm <sup>3</sup> |   |
| Mittelwasserabfluss  | 713 m <sup>3</sup> /s<br>Jahresreihe 1926/1996                       | 525 m <sup>3</sup> /s<br>Jahresreihe 1921/2002  |
| Abflussspektrum      | MNQ bis MHQ  |   |
| Laufzeit             | 1994 bis 1998  | 2001 bis 2008                                   |

Tabelle 1: Modelluntersuchungen der BAW

## 2 Einsatzgebiete hydraulischer Geschiebetransportmodelle

In der BAW werden hydraulische Modelle von Flüssen mit beweglicher Sohle zur Beantwortung von Fragestellungen an alluvialen Flüssen eingesetzt. Der Nutzen der hydraulischen Modelle liegt dabei in der Möglichkeit, physikalische Phänomene zu untersuchen, die mit numerischen Methoden zurzeit nicht oder nicht simulierbar sind:

- Die Zufälligkeiten der Sohlformen können in den Modellen ermittelt und berücksichtigt werden.
- Die Auswirkungen unterschiedlicher Stromregelungskonzepte auf die Sohlformen (Dünen/Transportkörper/Kolke/Querneigungen etc.) können untersucht werden.
- Untersuchungen zur Stabilität des Fahrrinnenverlaufes in Abschnitten mit über die Zeit veränderlichem Talwegsverlauf werden durchgeführt.
- Bei komplexen Veränderungen der Sohlform oder des Geschiebetransportes können Grundlagendaten für numerische Berechnungen erhoben werden (Änderung der mittleren Sohlhöhen, Veränderungen der Rauheit etc.) (Bild 3).
- Die Veränderungen der Rauheit durch andere Sohlformen in Folge von Änderungen des Stromregelungskonzeptes werden berücksichtigt und finden Eingang in begleitende numerische Simulationen.

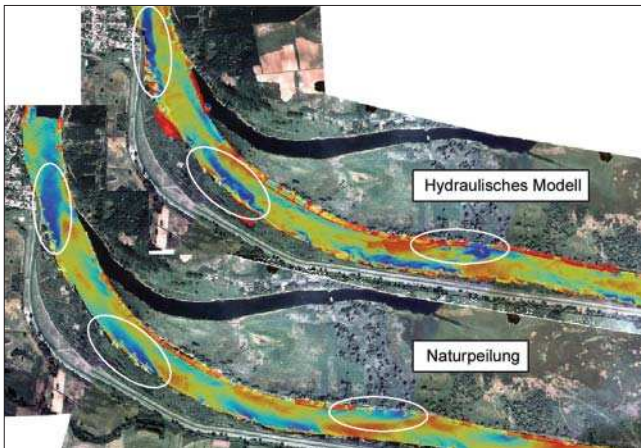


Bild 3: Ähnlichkeit der Sohlgeometrie Natur/Modell an einem Modell der Oder bei vergleichbarem Abfluss

In einem hydraulischen Modell ist bei Beachtung der Modellgesetze die Ähnlichkeit der räumlichen Strömungsstruktur und damit die Ausbildung der Zwei-Phasen-Strömung (Wasser und Sediment) weitgehend naturähnlich. Darüber hinaus unterliegen die Strömungsvorgänge in einem hydraulischen Geschiebetransportmodell, trotz Einhaltung gleicher Rand- und Anfangsbedingungen, einer mehr oder weniger großen Schwankungsbreite, ähnlich, wie es in der Natur der Fall ist (es gibt keine zwei exakt gleichen Versuchsabläufe). Die Bandbreite der möglichen Sohlhöhen und -formen kann somit in den hydraulischen Modellen erfasst und

statistisch ausgewertet werden. In den derzeit in der Anwendung befindlichen numerischen Modellen besteht hingegen in der Regel eine eindeutige Korrelation zwischen Rand- und Anfangsbedingungen auf der einen und Modellergebnissen in Form von Sohl- und Wasserspiegelhöhen auf der anderen Seite. (Bild 4)



Bild 4: Alternierende Kiesbänke (Modell Oder Hohenwutzen)

Weitere wesentliche Vorteile von hydraulischen Modellen bestehen darin, dass Unzulänglichkeiten der Naturerhebungen zum Teil ausgeglichen werden können. Flächige Sohlpeilungen aus der Natur sind z. B. in der Regel nur zu ausgewählten Zeitpunkten und nicht über die gesamte mögliche Abflussbandbreite verfügbar. Geschiebemessungen sind auch mit den modernsten Methoden in der Natur immer punktuell und zeitlich diskret und können, insbesondere bei alluvialen Flüssen mit einem ausgeprägten Transport in Form von Dünen, die Art und Menge des Transportes nur unzureichend darstellen. Hier können hydraulische Modelle ergänzende Informationen liefern, da summarische und zeitlich hoch aufgelöste Messungen kontinuierlich über einen langen Zeitraum erfolgen können.

## 3 Modelltheorie

### 3.1 Ähnlichkeitskriterien

Um die Möglichkeiten und die Grenzen des Einsatzes von hydraulischen Feststofftransportmodellen (FTM) beurteilen zu können, werden hier die Ähnlichkeiten, die für deren Betrieb relevant sind, zusammenfassend dargestellt.

Bezüglich der grundlegenden Eigenschaften von hydraulischen Geschiebetransportmodellen (GTM) wird auf die einschlägige Literatur verwiesen [Kobus 1984; DVWK-ATV 2003], in der insbesondere die Theorie der Ähnlichkeitsgesetze dargelegt wird. Hier wird nur insofern auf die Ähnlichkeitsgesetze eingegangen, als sie Besonderheiten der in der BAW in den letzten Jahren verwendeten hydraulischen Geschiebetransportmodelle



beinhalten. Die verwendeten Formelzeichen und Indizes sind in Kapitel 8 beschrieben.

### 3.1.1 Ähnlichkeit der Hydraulik

#### Ähnlichkeit der Geometrie

Die Ähnlichkeit der Geometrie ist die elementare Grundvoraussetzung und wird durch eine maßstäbliche Übertragung von Naturdaten in den Modellmaßstab erreicht. Um eine hinreichende Ähnlichkeit der Strömung zu erhalten, ist es jedoch oftmals erforderlich, bei der Transformation für die horizontalen und vertikalen Naturdaten unterschiedliche Maßstäbe zu wählen (Überhöhung, d. h. Höhenmaßstab ( $1 : H_r$ ) > Längenmaßstab ( $1 : L_r$ )).

#### Ähnlichkeit des Verhältnisses von Trägheits- zu Schwerekräften (Froude-Zahl)

Bei Abflussvorgängen mit freier Oberfläche wird der Fließvorgang durch die Schwerkraft aufrecht erhalten. Der Energiegehalt der Strömung teilt sich auf in kinetische Energie (Geschwindigkeitshöhe) und potenzielle Energie (Wasserspiegelhöhe). Diese Energiearten sind durch die Froude-Zahl ( $Fr$ ) verknüpft. Somit gilt als allgemeines Ähnlichkeitsprinzip die Froude-Ähnlichkeit. Durch die Einhaltung dieses Modellgesetzes ( $Fr_N = Fr_M$ ) wird das Verhältnis von Trägheits- und Schwerekräften im Modell gleich dem in der Natur.

#### Ähnlichkeit des Wasserspiegel- und Energieliniengefälles

Für eine maßstäbliche Ähnlichkeit der Wasserspiegel- und Energieliniengefälle ist neben der Einhaltung des Froude-Modellgesetzes die Ähnlichkeit der Energieverluste infolge Rauheit erforderlich. Da zu der Rauheit sowohl die Kornrauheit als auch die Formrauheit (Sohlform/Querschnittsform etc.) gehört, ist dieser Punkt beim Betrieb von hydraulischen Geschiebetransportmodellen besonders zu beachten. Die aus der Sohlform resultierende Rauheit ist bei der Planung eines Modells nicht in jedem Fall theoretisch ableitbar, sodass Vorversuche in einer Rinne bei unterschiedlichen Abflüssen zur Auswahl des Modellgeschiebes und zur Wahl der Modellüberhöhung hilfreich sein können.

Das gesamte Spektrum der möglichen, für die Rauheit relevanten Sohlformen ergibt sich jedoch erst in dem fertig gestellten und mit dem gewählten Sohlmaterial gefüllten hydraulischen Modell. Dort sind dann die Möglichkeiten einer Kalibrierung jedoch extrem eingeschränkt.

Lokale Verluste durch z. B. Bauwerke wie Brücken oder Buhnen oder infolge Querschnittsaufweitungen oder -einengungen werden bei Beachtung der Froude-

Ähnlichkeit in den hydraulischen Modellen korrekt berücksichtigt.

#### Ähnlichkeit der Turbulenz

Das Verhältnis zwischen Trägheits- und Zähigkeitskräften wird durch die Reynolds-Zahl ( $Re$ ) ausgedrückt. Dieses Ähnlichkeitskriterium für Turbulenzen ist maßgeblich für eine ähnliche Ausbildung von Wirbeln, Rückströmzonen, Ablösungen etc. zwischen Natur und Modell. Die vollständige Ähnlichkeit sowohl von Froude-Zahlen als auch von Reynolds-Zahlen zwischen Natur und maßstäblich verkleinerten Modellen ist nicht möglich. Daher wird beim Froudeschen Modellgesetz von der Ähnlichkeit der Turbulenzcharakteristik ausgegangen, d. h. dass die Strömung im Modell bei einer vollturbulenten Strömung in der Natur ebenfalls vollturbulent sein muss. Das ist gegeben, wenn die  $Re$ -Zahlen je nach Literatur größer sind als 3000 bis 5000 (Analog zur Turbulenzgrenze bei Rohrströmungen bei  $Re = 2320$ ) [Kobus 1984; Dorer 1984; DVWK 2003]. Das ist im Flussschlauch der hydraulischen Modelle gegeben, in den Randbereichen (z. B. in Bühnenfeldern) erreicht man jedoch, insbesondere bei kleinen und mittleren Abflüssen Bereiche mit relativ kleinen Reynoldszahlen, sodass hier beurteilt werden muss, inwieweit diese Abweichung der Strömungscharakteristik für die jeweilige Fragestellung von Relevanz ist (s. dazu auch den Beitrag von [Faulhaber 2007] in diesem Heft).

### 3.1.2 Ähnlichkeit des Geschiebetransports

#### Ähnlichkeit des Geschiebetransportbeginns

Diese Ähnlichkeit ist für die Modellierung von Geschiebetransportvorgängen von großer Bedeutung. Da die hydraulischen Randbedingungen (Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten, Gefälle etc.) durch das Froude-Gesetz vorgegeben sind, ist die Ähnlichkeit des Geschiebetransportbeginns durch die Wahl eines geeigneten Sohlmaterials zu erreichen. Für den Bewegungsbeginn ist die Ähnlichkeit der Froude-Zahlen des Geschiebekornes ( $Fr_c$ ) in Natur und Modell maßgeblich. Die Materialeigenschaften werden dabei durch die spezifische Kenngröße  $D$  gekennzeichnet (s. Bild 5; die schräg verlaufenden Linien zeigen die Materialkennlinien  $D^*$  für einen Natursand und mehrere mögliche Modellsedimente).

#### Ähnlichkeit des Geschiebetransports

Ein konstantes Verhältnis der Geschiebefracht zwischen der Natur und dem Modell über das gesamte untersuchte Abflussspektrum ist für den instationären Betrieb eines hydraulischen Geschiebemodels anzustreben. Die Geschiebefracht ist insbesondere abhängig von einem ähnlichen Verhältnis der  $Fr^*$ - und  $Re^*$ -Zahlen zwischen Natur und Modell. Die  $Re^*$ -Werte ge-

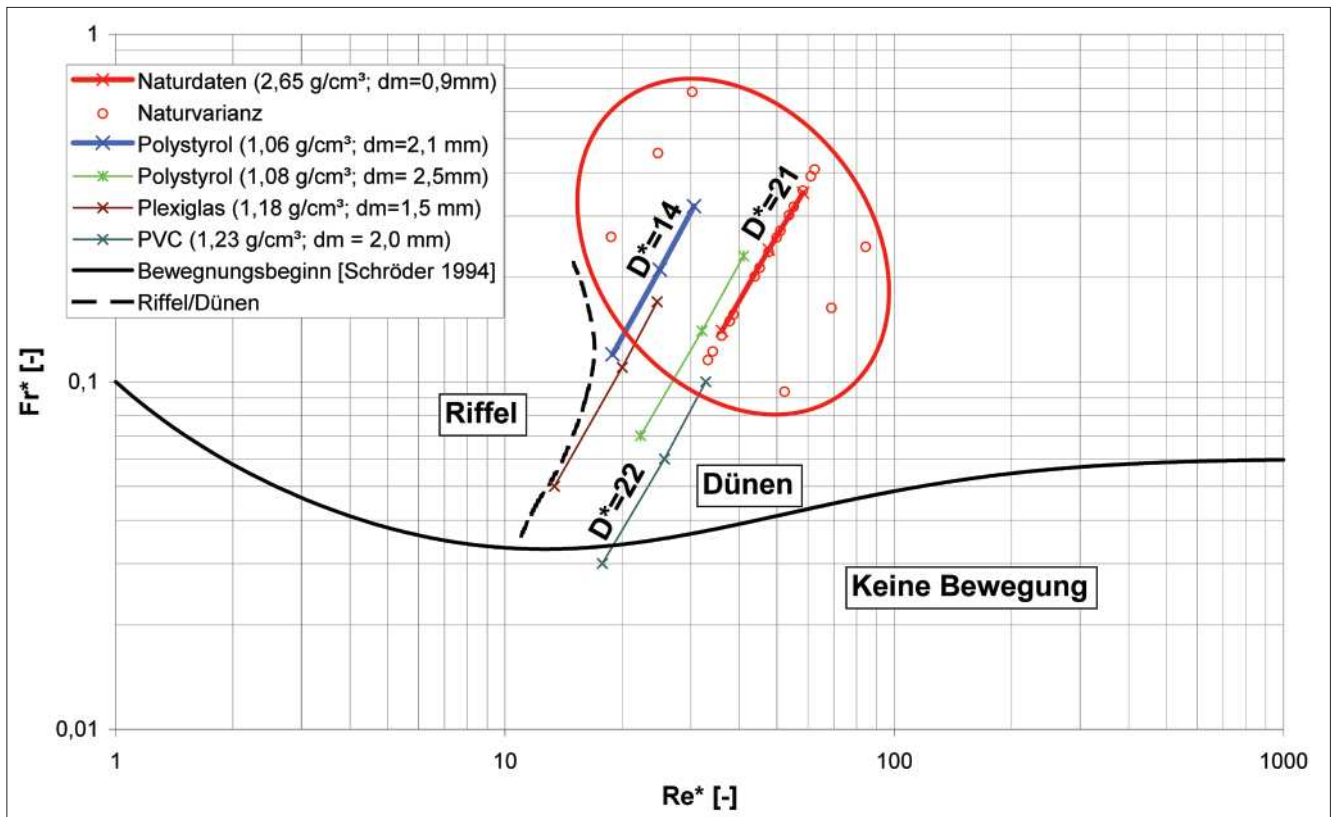


Bild 5: Shields-Diagramm mit sedimentologischen Kenngrößen (Naturdaten für die Oder bei Hohenwutzen, Modelldaten für unterschiedliche Modellsedimente)

winnen bei Werten  $Re_*^* < 70$  an Bedeutung, wie sie bei sandigen und feinkiesigen Gewässern auftreten. Hier nimmt dann auch die Abhängigkeit der Sohlformen von der  $Fr^*$ -Zahl zu.

Die genaue Korrelation der Transportmengen zwischen Natur und Modell wird darüber hinaus durch den sedimentologischen Zeitmaßstab kalibriert (s. unten).

### Ähnlichkeit der Sohlformen

Die Sohlformen (Dünen, Riffel, Kolke) sind bei vielen Fragestellungen nicht nur relevant für die Nachbildung der relativen Rauheit, sondern stellen direkt einen Untersuchungsschwerpunkt dar. Dazu gehört zum Beispiel die Untersuchung von Transportkörpern zur Ermittlung von Fahrrinntiefen oder der Stabilität von Fahrrinnenverläufen. Empirische Ansätze zur Errechnung von Transportkörperdimensionen (Länge, Höhe, Steilheit) beruhen oftmals lediglich auf vereinfachenden Rinnenversuchen oder vereinzelt Naturdaten und führen oft zu widersprüchlichen Ergebnissen.

Hinzu kommt, dass bei Modellen mit Ersatzmaterial die Korngröße überproportional zunimmt, sodass insbesondere Sohlformen in der Größenordnung des Korndurchmessers des Modellgeschiebes nicht mehr naturähnlich abgebildet werden können. Diese Kleinformen (Riffel und Dünenhöhen  $< 1$  dm in der Natur) sind aber für die Untersuchungen der BAW für die Was-

ser- und Schifffahrtsverwaltung ohne Bedeutung. Die Ähnlichkeit größerer Formen ist demgegenüber gut erreichbar (s. Bild 3). Als wesentlicher Parameter für die Ähnlichkeit der Sohlformen ist neben den im Shields-Diagramm (s. Bild 5) aufgeführten Werten  $Re_*^*$ ,  $Fr^*$  und  $D^*$  die Form der Kornverteilungskurve (z. B. über die Ungleichförmigkeit  $U$  von fraktioniertem Material als  $d_{60}$  zu  $d_{10}$ ) zu nennen.

Der Bewegungsbeginn ist bei gegebener Dichte abhängig von der Korngröße, sodass unterschiedliche Anteile des Sedimentes bei unterschiedlichen Schubspannungen in Bewegung geraten. Da die Schubspannungsverteilung an der Sohle von Flüssen über Ort und Zeit extrem variabel ist, wodurch es zur Ausbildung vielfältiger Sohlformen kommt, wird bei den Untersuchungen der BAW versucht, die Kornverteilung des Modellgeschiebes (hier über den Ungleichförmigkeitsquotienten  $U_{d60/d10}$ ) an die Kornverteilung des Naturgeschiebes anzupassen.

### 3.1.3 Nachweise der Ähnlichkeiten

Von den o. g. Ähnlichkeitsbedingungen lassen sich einige durch Berücksichtigung der Modellgesetze direkt einhalten. Andere sind nur im Rahmen ihres Gültigkeitsbereiches und weitere nur durch den Nachweis in Labor- oder Modellversuchen zu belegen.

Direkter Nachweis zur Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze möglich:

Froude-Zahl ( $Fr$ )

Sedimentologischer Korndurchmesser ( $D^*$ )

Froude-Zahl des Einzelkorns ( $Fr^*$ )

Einhaltung von Gültigkeitsbereichen erforderlich:

Reynolds-Zahl ( $Re$ )

Reynolds-Zahl des Einzelkorns ( $Re^*$ )

Ähnlichkeitsnachweis nur im Rinnenvorversuch oder mit dem fertiggestellten Modell möglich:

Ähnlichkeit der Formrauheit

Ähnlichkeit der Sohlformen

Ähnlichkeit der Transportmengen

Durch diese unterschiedlich belastbar einzuhaltenden Ähnlichkeitskriterien lassen sich die Modellmaßstäbe (Umrechnungsfaktoren zwischen Natur- und Modellgrößen) mehr oder weniger eindeutig festlegen. Während die Geometrie und die hydraulischen Maßstäbe feste Werte darstellen, sind die hydrologischen und morphologischen Zeitmaßstäbe oftmals erst am fertigen Modell im Rahmen der Kalibrierung genau zu definieren.

### 3.2 Zeitmaßstäbe

Bei der Analyse zeitabhängiger Vorgänge, wie sie der Geschiebetransport darstellt, ist die Kenntnis des Zeitmaßstabes, mit dem im Modell die Naturgeschehnisse simuliert werden, wichtig. Da das Geschiebetransportmodell die Naturabläufe vereinfacht, gelten nicht für alle auftretenden Phänomene die gleichen Zeitmaßstäbe. Bei instationären Untersuchungen muss das Modell aber entsprechend eines hydrologischen Zeitmaßstabes gesteuert werden.

Es werden hier folgende Zeitmaßstäbe unterschieden (Formel 1) (zu den Abkürzungen siehe Kap. 8):

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Hydraulischer Zeitmaßstab (Froude-Gesetz):                          | $t_r = \sqrt{h_r}$               |
| Hydrologischer Zeitmaßstab nach [Dorer 1984]:                       | $t_r = \sqrt{n \cdot L_r}$       |
| Sedimentologische Zeitmaßstäbe:                                     |                                  |
| Zeitmaßstab für den Feststoff - Volumentransport nach [Dorer 1984]: | $t_{tr} = \frac{L_r^{3/2}}{d_r}$ |
| Zeitmaßstab für die Entwicklung von Dünen nach [Yalin 1975]:        | $t_{TKr} = h_r^2$                |

Nach dem hydraulischen Zeitmaßstab findet die Bewegung des Fluides statt (Maßstab für die Fließgeschwindigkeit). Er ist nach dem Froudeschen Modellgesetz direkt zu berechnen und liegt in der Regel zwischen 1 : 5 und 1 : 10.

Der hydrologische Zeitmaßstab ist relevant für den Ablauf von instationären Strömungsvorgängen (z. B. Hochwasserwellen). Er bestimmt zum Beispiel, mit welcher Geschwindigkeit sich Vorland- und Retentionsbereiche bei steigendem Abfluss füllen. Nach der oben genannten Gleichung von Dorer ergibt sich üb-

licherweise ein hydrologischer Zeitmaßstab zwischen 1 : 7 und 1 : 20. Bei Modellen mit fester Sohle, bei denen der Ablauf instationärer Vorgänge exakt nachgebildet werden soll, ist darauf zu achten, dass der hydraulische und der hydrologische Zeitmaßstab möglichst nahe bei einander liegen. Das ist bei Modellen mit einer beweglichen Sohle oft nicht erreichbar (s. unten).

Die sedimentologischen Zeitmaßstäbe kennzeichnen die Verhältnisse der Geschwindigkeiten des Geschiebetransportes. Hierbei muss unterschieden werden zwischen dem Geschiebetransport (Volumen pro Zeiteinheit) und der Bewegung von Sohlformen. Nach den Gleichungen oben ergeben sich Zeitmaßstäbe zwischen 1 : 1000 und 1 : 3000. Insbesondere die Gleichung für die Entwicklung von Dünen stellt auf Grund des noch unzureichenden Wissens über die Ähnlichkeitsgesetze zur Beschreibung von Dünenbewegungen in Modellen nur eine sehr grobe Näherung dar.

Während der hydraulische Zeitmaßstab bei Geschiebetransportmodellen unabhängig von den hydrologischen und sedimentologischen Zeitmaßstäben ist, sind letztere bei Untersuchungen mit instationären Abflusszuständen voneinander abhängig. Man ist hier gezwungen, einen Kompromiss einzugehen. So lässt sich der hydrologische Zeitmaßstab in der Regel deutlich verkleinern. Dabei ist zu beachten, dass durch eine zeitliche Stauchung einer Wasserstandsganglinie (Änderung des Modellzuflusses im hydrologischen Zeitmaßstabes) die Gefahr besteht, dass das Gefälle im Modellfluss bei einem zu stark zeitmaßstäblich verkürzten Anstieg des Abflusses zu groß bzw. bei dem Abfall zu klein wird und damit den Geschiebetransport erheblich verfälschen kann. Es ist also in Vorversuchen zu testen, in welchen Bereichen man den hydrologischen Zeitmaßstab ohne negative Veränderungen der Wassertiefen und der Gefälle variieren kann.

Eine Veränderung des sedimentologischen Zeitmaßstabes hat in der Regel weniger problematische Auswirkungen. Er hat bezüglich des Betriebes eines Modells nur Auswirkungen auf den Geschiebeeintrag am oberstromigen Modellrand. Er wird daher in der Regel während der Modellkalibrierung aus der Geschwindigkeit von Geschiebetransportprozessen im Modell ermittelt und dann auf die Randbedingungen übertragen. Zu beachten ist dabei, dass mit einem vergrößerten sedimentologischen Zeitmaßstab Sohlveränderungen im Modell in Relation zum hydrologischen Zeitmaßstab deutlich schneller ablaufen als in der Natur, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten ist.

Bei den in der BAW betriebenen Modellen von Elbe und Oder lagen die theoretischen hydrologischen Zeitmaßstäbe bei etwa 1 : 16 und die sedimentologischen Zeitmaßstäbe zwischen 1 : 1000 und 1 : 2500. Da in den Modellen keine extremen Hochwasserereignisse

mit großen Scheiteln oder steilen Anstiegen untersucht wurden (s. u. zum Problem des Überganges Geschiebe/Schwebstoff in sandig/feinkiesigen Flussabschnitten), war es möglich, mit hydrologischen Zeitmaßstäben zwischen 1 : 300 und 1 : 800 zu arbeiten. Die Abweichungen der Gefälle und Wassertiefen waren dabei relativ geringfügig (Abflussganglinien über zwei Jahre in der Natur bzw. 20 bis 30 Stunden im Modell entsprachen bezüglich der langfristigen Sohlentwicklung einem Zeitraum von etwa sechs bis zehn Jahren in der Natur).

Für Detailfragestellungen werden in der Bundesanstalt für Wasserbau neben den großen Modellversuchen auch relativ kleinformatige Rinnenversuche durchgeführt. Bei diesen sind die Ähnlichkeitskriterien und die jeweiligen Methoden der Untersuchungen jedoch sehr stark von der jeweiligen Aufgabenstellung abhängig, sodass sie hier nicht allgemeingültig beschrieben werden.

### 3.3 Grenzen der Modellähnlichkeit

Neben den genannten Möglichkeiten einer weitgehend naturähnlichen Simulation von Geschiebetransportvorgängen in hydraulischen Modellen gibt es nach wie vor deutliche Grenzen der Übertragbarkeit der beobachteten Phänomene. Im Folgenden sind einige Aspekte zusammengestellt, bei denen für die Übertragbarkeit keine Methoden bekannt sind oder die Realisierung zu aufwändig ist.

#### Schwebstofftransport

Bei Untersuchungen zum Schwebstoff treten neben den allgemeinen Problemen des Geschiebetransportes weitere Phänomene auf, die die Simulation in Flussmodellen erheblich erschweren oder unmöglich machen. Dazu gehört der abflussabhängige Übergang zwischen Geschiebe und Schwebstoff, die temporäre Ablagerung von Feinmaterial in strömungsberuhigten Zonen, die biologische Verfestigung der Sohle in diesen Bereichen und die Remobilisierung bei steigender Sohlschubspannung. Daher wurden in den letzten Jahren in der BAW keine Modelluntersuchungen zum Schwebstofftransport oder zu Schwebstoffablagerungen durchgeführt. In engem Zusammenhang damit steht der nächste Punkt.

#### Hohe Geschwindigkeiten bei kleinen Korndurchmessern

In alluvialen Gewässern mit Korngrößen um 1 mm oder kleiner kommt es bereits bei mittleren Hochwasserereignissen zu Fließgeschwindigkeiten im Fluss-schlauch, bei denen die Turbulenzen so groß werden, dass wesentliche Teile des Geschiebes nicht mehr an der Sohle, sondern in der fließenden Welle transportiert werden. Es gibt dann keine klar definierte Sohle mehr.

Dieser Zustand ist in der Natur messtechnisch kaum zu fassen und wurde in den von der BAW betriebenen hydraulischen Modellen nicht nachgebildet; das Untersuchungsspektrum endete bei mittleren Hochwasserereignissen. Bild 6 zeigt beispielhaft für einen Untersuchungsabschnitt der Oder den abflussabhängigen Übergang von Geschiebe zu Schwebstoff in der Natur. Bei einem mittleren Korndurchmesser von 0,9 mm wird mit der verwendeten Überschlagsgleichung nach Kresser [Dorer 1984] bei etwa 1,75 m/s ( $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ ) die Grenzgeschwindigkeit überschritten. Das Untersuchungsspektrum wurde aus diesem Grund auf mittlere Geschwindigkeiten bis maximal 1,5 m/s ( $Q = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) beschränkt.

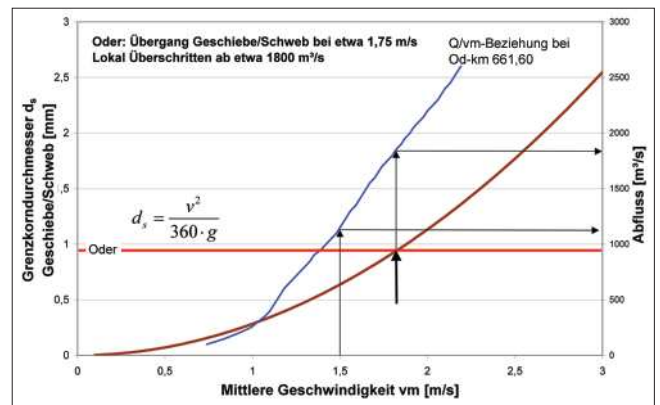


Bild 6: Übergang Geschiebe/Schwebstoff

#### Temperaturabhängigkeit des Geschiebetransports

Der Geschiebetransport ist über die Turbulenz ( $Re$ ) abhängig von der Zähigkeit des Fluids (kinematische Viskosität). Diese ist wiederum abhängig von der Temperatur (s. Bild 7), sodass bei vergleichbaren Abflüssen erhebliche Unterschiede in Menge und Form in Abhängigkeit von der Temperatur, zum Beispiel zwischen Sommer und Winter, auftreten können.

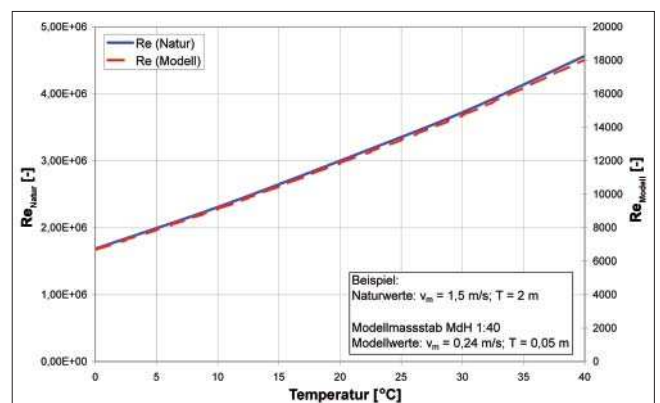


Bild 7: Abhängigkeit der  $Re$ -Zahl von der Temperatur bei MQ

Bei der Streubreite der Messwerte in der Natur in Verbindung mit einer in der Regel unzureichenden Datenmenge muss dieser Aspekt meistens vernachlässigt werden. Bei Untersuchungen in Modellen jedoch,



bei denen bei exakt gleichen Rand- und Anfangsbedingungen unterschiedliche Varianten untersucht werden, ist die Beachtung der Modelltemperatur von großer Bedeutung, da, wie die o. g. Untersuchungen zeigen, die Unterschiede im Geschiebetransport bei größeren Temperaturschwankungen im Labor ähnliche Größenordnungen wie die Auswirkungen der Varianten ergeben können.

In den hydraulischen Geschiebetransportmodellen der BAW wird daher die Temperatur des Modellwassers und des Wassers in den Messtöpfen (s. dazu Abschnitt Modelltechnik) permanent aufgezeichnet (s. Bild 8, Temperaturschwankung jeweils zum Beginn und zum Ende eines Versuchstages). Die Wassertemperatur in dem gezeigten Beispiel aus einem Modell der Oder schwankt etwa zwischen 11 und 17°C, an außergewöhnlichen Tagen zwischen 7 und 19°C. Daraus ergeben sich für das Modell nach dem Beispiel in Bild 7 temperaturbedingte Schwankungen der Reynoldszahl zwischen 9000 und 12000 bei Mittelwasser. Diese starke Abhängigkeit erfordert temperierte Laboratorien für Geschiebetransportuntersuchungen.

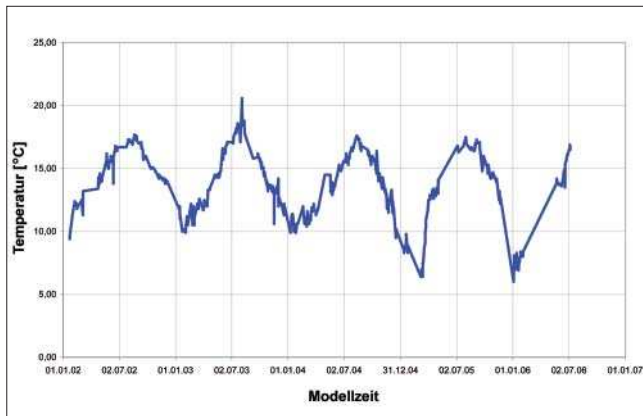


Bild 8: Temperaturverlauf in einem hydraulischen Modell

### Unzulängliche Ähnlichkeit in Randbereichen

Wie aus Bild 7 ersichtlich, sind in hydraulischen Modellen die Reynoldszahlen deutlich kleiner als in der Natur (hier Faktor 250). In strömungsberuhigten Bereichen mit geringen Fließgeschwindigkeiten (z. B. Buhnenfeldern oder Vorland) kommt es daher, insbesondere bei kleinen und mittleren Abflüssen, zu Strömungen, bei denen die Reynoldszahlen sehr klein werden ( $Re \ll 3000$ ), sodass hier die Strömung nicht mehr voll turbulent ist (s. Bild 9).

Untersuchungen zum Feststofftransport in Buhnenfeldern und auf dem Vorland sind daher Einschränkungen unterworfen. Neben dem Problem der unzureichenden Ähnlichkeit der Strömung kommt hinzu, dass es sich um Bereiche mit Ablagerungen von Feinmaterial, biologischen Verfestigungen und Remobilisierungen handelt. Diese Aspekte des Feststofftransportes können kaum mit vertretbarem Aufwand in hydraulischen

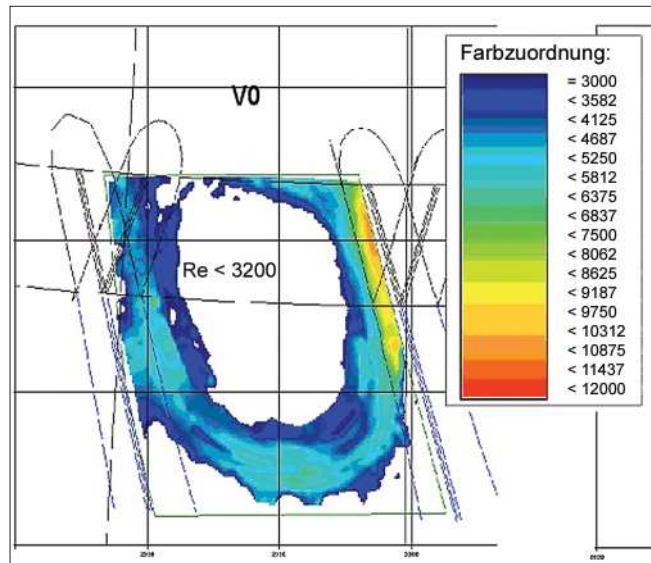


Bild 9: Reynoldszahlen in einem Buhnenfeld bei El-km 440, Maßstab 1 : 30

Modellen nachgebildet werden. Daher beschränkten sich die Untersuchungen der BAW zum Feststofftransport mit hydraulischen Modellen in den letzten Jahren auf Bereiche mit hinreichend großen Re-Zahlen bzw. auf den für die Schifffahrt relevanten Flussschlauch und dort auf den Geschiebetransport.

### Sekundärströmungen sind durch die Modellüberhöhung nicht naturähnlich

Durch Modellüberhöhungen und verkleinerte Reynoldszahlen verändern sich die Wirbelstrukturen und Sekundärströmungen nicht in dem gleichen Maßstab wie die Geometrie, wodurch die Ähnlichkeit der Strömung und die der Ausbildung von Sohlformen eingeschränkt werden.

Zu dem Problem der veränderten Ablösewinkel in gegenständlichen Modellen siehe den Artikel [Faulhaber 2007] in diesem Heft, auf die Ähnlichkeit von Kolkbildungen in Modellen geht [Ettmer 2007] in seinem Beitrag ein.

### Auswirkungen der Schifffahrt auf den Geschiebetransport

Zu diesem Themenkomplex liegen bisher aus der Natur nur wenige Untersuchungen und Analysen vor [BAW 1997; BAW 2004] und zur Untersuchung in hydraulischen Modellen wurden bisher keine Referenzen gefunden. Rinnenversuche wurden nach derzeitigem Wissen nur zur Hydraulik und zur direkten Wechselwirkung mit der Morphologie durchgeführt [Schankat 2006]. Problematisch ist hier die gleichzeitige Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze für den Geschiebetransport auf der einen und für die schiffsinduzierte Hydraulik auf der anderen Seite (Erfordernis der gleichzeitigen



Ähnlichkeit der Hydraulik, Sedimentbewegung, Schiffs-umströmung und des Schraubenstrahls).

### Fraktionierter Geschiebetransport

Fraktionierter Geschiebetransport ist in hydraulischen Modellen in der Regel gut nachbildbar. Die Verwendung einer weitgehend naturähnlichen Kornverteilung (s. Bild 10) ist bei vielen Untersuchungen Voraussetzung für die geometrische Naturähnlichkeit der Sohlformen im Modell (gleiche Ungleichförmigkeit). Wichtig ist dabei der Nachweis, dass es durch den Modellbetrieb nicht zu einer naturunähnlichen Entmischung des Sohlmaterials kommt.

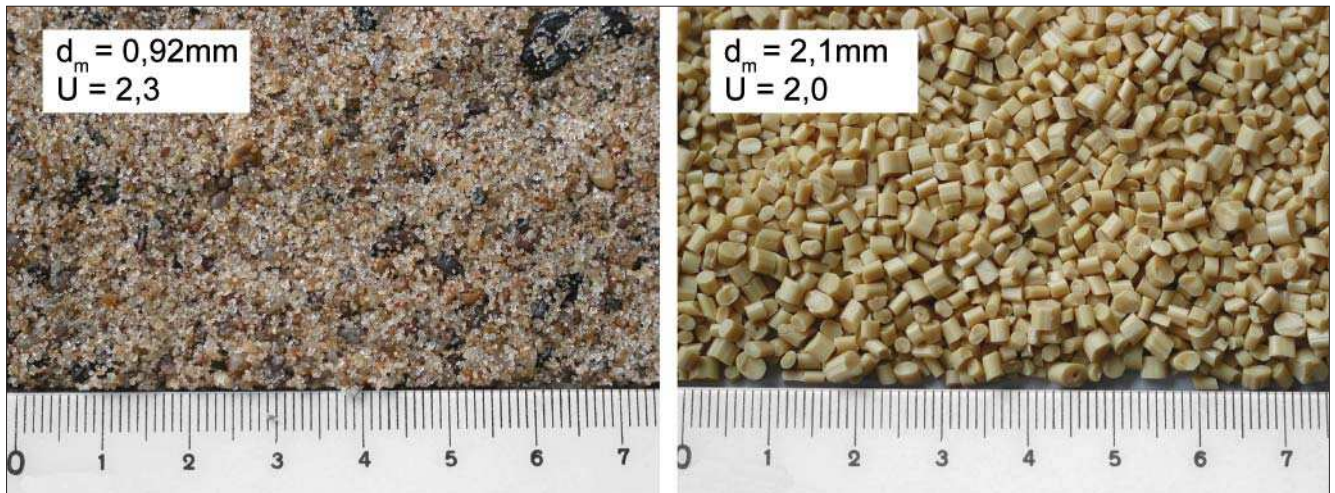


Bild 10: Natur- (Oder-Sand) und Modellgeschiebe (Polystyrol)

Problematisch ist bei fraktioniertem Geschiebetransport, dass die Korngrößen in der Regel nicht im Modellmaßstab verkleinert werden können (rolliges Material würde bindig und seine hydraulischen Eigenschaften gravierend verändern), sodass auf ein gröberes und leichteres Ersatzmaterial zurückgegriffen wird. Das extrem feine Sohlmaterial fehlt somit in der Regel in den im Modell verwendeten Fraktionen, wodurch u. a. keine kleinen Sohlformen (Riffel) nachgebildet werden können.

### Modelle mit einem Schichtenaufbau des Untergrundes

Derartige Modelle sind erforderlich, wenn zum Beispiel Abpflasterungserscheinungen oder Grobkornanreicherungen untersucht werden sollen.

Modelle mit über die Tiefe oder Breite unterschiedlichem Sohlmaterial können zwar prinzipiell auch betrieben werden, setzen jedoch bei der Versuchsvorbereitung einen erheblichen Aufwand voraus, da der Sohl- aufbau vor jeder Versuchsserie erneut hergestellt werden muss. In der Bundesanstalt für Wasserbau wurden Schichtenmodelle für Untersuchungen größerer Flussabschnitte bisher nicht eingesetzt.

## 4 Modelltechnik am Beispiel des Odermodells bei Hohenwutzen

### 4.1 Allgemeines

Die Schwerpunkte bei der Anwendung von hydraulischen Geschiebetransportmodellen lagen in den letzten Jahren nicht in der Weiterentwicklung der Modelltheorie, sondern in der Entwicklung neuer Betriebs-, Mess- und Auswerteverfahren. Das war zum einen möglich durch die rasante Entwicklung im Bereich der industriell verfügbaren Messsysteme, zum Beispiel im Bereich der Photogrammetrie und Bildverarbeitung aber auch im Bereich der Rechentechnik. Es ergaben

sich darüber hinaus erhöhte Anforderungen an die Ergebnisse aus den Modellen (Auflösung, Genauigkeit, Zeitplan) sowohl von Seiten der Auftraggeber, als auch von Seiten der Entwickler numerischer Verfahren. Für diese stellen die in den Modellen erfassten Daten physikalischer Phänomene des Feststofftransportes wichtige Grundlagen zur Entwicklung von Algorithmen für numerische Verfahren dar.

### 4.2 Modellieren der Sohle, Füllen und Entleeren des Modells

Vor jeder Versuchsserie muss das Modell in einen definierten und reproduzierbaren Zustand gebracht werden. Dazu ist die Modellsohle auf ein dem gewählten Naturzustand entsprechendes Niveau zu modellieren. Die hohe Dynamik der hier beschriebenen Modelle von Elbe und Oder ermöglicht hier ein vereinfachtes Verfahren, bei dem mit einem Abziehschlitten die Sohle auf eine Ebene modelliert wird (s. Bild 11). Diese Ebene ist in Fließ- und Querrichtung geneigt. Die Sohlformen werden dadurch nicht abgebildet, das Volumen des Sohlmaterials ist jedoch im Mittel korrekt. Nach ca. 1/2 Stunde Modellbetrieb hat sich dann bei jedem Abfluss eine bezüglich der Form naturähnliche Sohle herausgebildet. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens ist neben der starken Vereinfachung und der schnellen



Bild 11: Einebnen der Modellsohle

und unkomplizierten Herstellung eines Ausgangszustandes die hohe Reproduzierbarkeit des Sohlniveaus. Die Methode der Sohlvermessung wird in Kapitel 4.6 beschrieben.

Für die Versuche wird ein Polystyrolgranulat mit einer Dichte von  $1,055 \text{ g/cm}^3$  verwendet. Dieses Material ist nur unwesentlich schwerer als Wasser und schwimmt im trockenen Zustand auf der Wasseroberfläche. Daher ist es für das Füllen des Modells erforderlich, dass das Modell von beiden Seiten langsam gefüllt wird und dass die Oberfläche während des Füllvorganges beregnet wird (s. Bild 12).



Bild 12: Beregnen des Modells während des Füllvorganges

Das Flussbett wurde im Untergrund mit einem Drainagesystem zur vertikalen Modellentwässerung ausgerüstet. Beim Entleeren würde es sonst zu horizontalen Strömungen mit zum Teil sehr hohen Geschwindigkeiten kommen, welche die Sohlstrukturen verfälschen würden. Bild 13 zeigt die Drainageleitungen, die an mehreren Stellen aus dem Modell herausgeführt werden und verschlossen werden können. Daneben sind in dem Bild die Messstellen für die Modellwasserspiegel zu sehen und man erkennt, dass der gesamte Untergrund des Modells mit dem beweglichen Sohlmaterial aufgefüllt wird.



Bild 13: Drainagesystem im Flussschlauch zur Entwässerung, Wasserspiegel - Messstellen

#### 4.3 Wasserstands- und Abflusssteuerung, Temperaturmessungen

Für die Beurteilung unterschiedlicher Untersuchungsvarianten spielt die genaue Kenntnis der Wasserstände ebenso eine Rolle, wie sie für die hydraulische Kalibrierung eine zwingende Voraussetzung ist. Die Wasserstände werden in den Modellen mit konventionellen Ultraschallpegeln außerhalb des Modells nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 mm gemessen (s. Bild 14). Eine Besonderheit ergibt sich bei Geschiebetransportmodellen daraus, dass die Wasserstände auch bei stationären Abflusszuständen nicht konstant sind, sondern in Abhängigkeit von Sohlhöhenänderungen oder Sohlbewegungen deutlich variieren. Daher werden die Wasserstände alle 15 Sekunden gespeichert. Bei den Auswertungen stationärer Versuche werden bei Versuchsdauern zwischen 2 und 4 Stunden die Wasserstände der letzten halben Versuchsstunde zu einem resultierenden Wert gemittelt. Durch diese Mittelwertbildung werden Schwankungen des Wasserspiegels zum Beispiel infolge durchwandernder Transportkörper ausgeglichen, sodass diese mittleren Wasserspiegellagen zwischen Untersuchungsvarianten verglichen werden können.

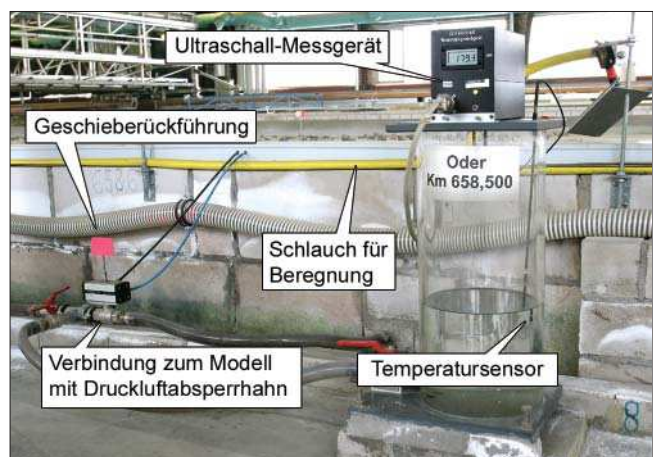


Bild 14: Ultraschall-WSP-Messstelle mit Temperatursensor



Neben den Wasserständen wird in zwei Messtöpfen ebenso wie im Modelleinlauf die Temperatur des Wassers gemessen (s. Bild 15) und ebenfalls alle 15 Sekunden gespeichert. Die Temperaturmessungen sind erforderlich, um zum Einen eine langfristige Konstanz der Versuchsabläufe ohne relevante Veränderungen der für den Geschiebetransport wesentlichen hydraulischen Eigenschaften des Wassers nachzuweisen, und zum anderen, um Fehler bei der Bestimmung des Wasserstandes durch temperaturbedingte Dichteunterschiede zwischen dem Modellwasser und dem Wasser in den Messtöpfen zu vermeiden.

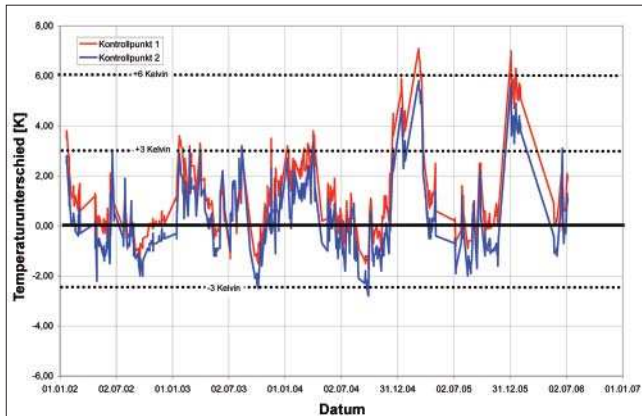


Bild 15: Temperaturunterschied zwischen Modellwasser und Wasser in den Messtöpfen

Bild 16 zeigt für unterschiedliche Wassertiefen in den Messtöpfen die temperaturabhängigen Abweichungen der Wasserstände durch Dichteunterschiede zwischen dem Modell und den Messtöpfen. Bei einer Wassertiefe von 30 cm sieht man, dass bei einem Temperaturunterschied von 3,3 K (entsprechend 3,3°C) eine Abweichung von 0,1 mm im Modell und damit eine Abweichung im Bereich der Messgenauigkeit des Systems auftritt (bei einem Höhenmaßstab von 1:50 entsprechen 0,1 mm im Modell 5 mm in der Natur). Die Wasserstände in den Messtöpfen bei den Modelluntersuchungen liegen etwa zwischen 15 und 30 cm.

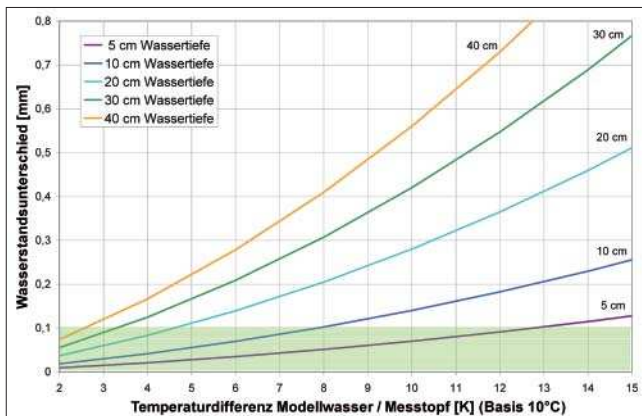


Bild 16: Wasserstandsabweichungen durch temperaturbedingte Dichteunterschiede

Bild 15 zeigt den Jahresgang aus einem in der BAW betriebenen hydraulischen Modell. Das Bild zeigt, dass im Frühjahr 2005 und 2006 der Temperaturunterschied zwischen dem Modellwasser und den Messtöpfen im Maximum bei etwa 7 Kelvin lag. Daraus folgt nach Bild 16, dass der Wasserstand auf Grund der temperaturbedingten Dichteunterschiede bei einem Wasserstand von ca. 20 cm in den Messtöpfen etwa 0,17 mm höher als im Modell war (Bei einem Höhenmaßstab von 1 : 40 ergibt sich daraus ein Messfehler von ca. 7 mm bezogen auf die Natur).

Bei Untersuchungen zum Geschiebetransport sind neben stationären Betrachtungen bei einigen Fragestellungen auch instationäre Untersuchungen erforderlich. Bei den betriebenen Modellen wird dafür der Zufluss zum Modell über einen rechnergesteuerten induktiven Durchflussmesser (IDM) mit motorbetriebenem Schieber geregelt.

Für die unterstromige Wasserstandssteuerung wurde ein Lamellenwehr entwickelt (s. Bild 17). Es handelt sich dabei um ein Regelorgan mit übereinander angeordneten horizontal verschiebbaren Lamellen, mit denen abflussabhängige Querschnitte und Widerstandsbeiwerte sehr genau eingestellt werden können. Damit erhält man ein festes Regelorgan, welches die unterstromige W/Q-Beziehung nach einer einmaligen Kalibrierung sehr genau nachstellt ( $\pm 0,2$  mm). Im Gegensatz zu einem klassischen Überfallwehr benötigt man somit im Betrieb keine abflussabhängige Regelung oder Steuerung.

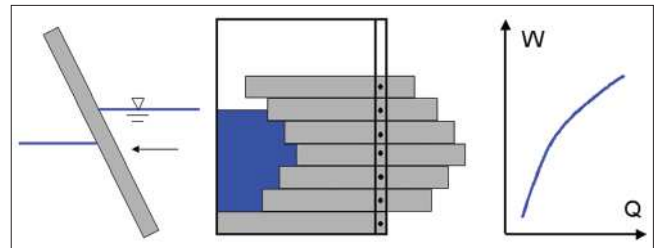


Bild 17: Systemskizze Lamellenwehr

#### 4.4 Geschiebekreislauf

Am oberstromigen Modellrand muss das auch in der Natur in die Strecke hineintransportierte Geschiebe zugegeben und am unteren Modellrand das ausgetragene Material dem Modell wieder entnommen werden. Die Zugabemenge ist dabei abhängig vom Abfluss und auf der Grundlage von Naturdaten zu kalibrieren. Die ausgetragenen Mengen sind für die Analyse der Wirkung unterschiedlicher Regelungsvarianten zu quantifizieren.

Es kann bei den Untersuchungen der BAW zur Wirkung von Stromregelungskonzepten keinen Transport des ausgetragenen Geschiebes zum Modelleinlauf in einem geschlossenen Kreislauf geben, da in Abhän-





Bild 18: Übersicht Modelleinlauf

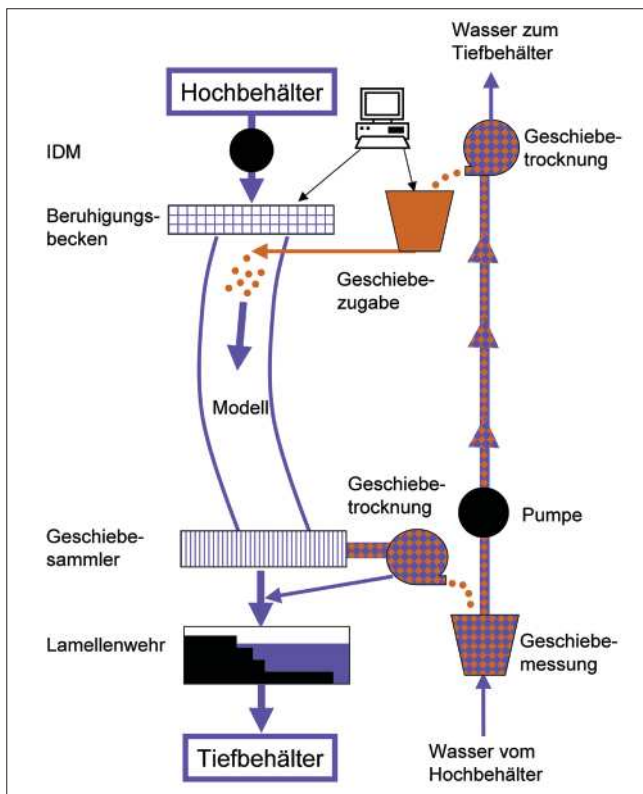


Bild 19: Systemskizze, Wasser- und Geschiebekreislauf

gigkeit vom Modellzustand ein Ungleichgewicht zwischen Ein- und Austrag besteht (die Sohle tieft sich z. B. im Mittel durch eine Variante ein) (s. Bild 18 und Bild 19). Daher wird das Geschiebe am Modellauslauf aufgefangen und vom Wasserkreislauf getrennt, zum oberen Modellrand transportiert (Transport über einen

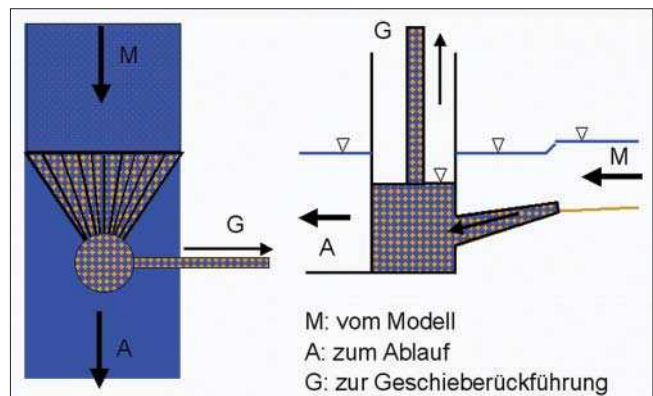


Bild 20: Systemskizze zur Geschiebeabsaugung

wassergefüllten Schlauch mit einer Exzenter-Schneckenpumpe; separater Wasserkreislauf). Dort wird es vom Transportwasser getrennt und über eine rechnergesteuerte Dosiereinrichtung mit Vorratsbehälter abflussabhängig dem Modell wieder zugegeben.

Am unteren Modellrand wird das Geschiebe sohnah über eine Unterdruckabsaugung dem Modell entnommen (Geschiebesammler) (s. Bild 20 und Bild 21). Bei diesem System wird durch eine Pumpe in mehreren parallelen Röhren in Sohlhöhe am Modellauslauf ein Unterdruck erzeugt, mit dem das Geschiebe sohnah über die Gewässerbreite abgesaugt wird. Der größte Teil des Wassers fließt oberhalb der Absaugung direkt zum Modellauslauf (Lamellenwehr). Das abgesaugte Wasser-/Geschiebegemisch wird über eine Trocknungsschnecke getrennt (Abtropfverfahren). Mit der Geschiebeabsaugung werden etwa 90 % des Geschiebes automatisch erfasst (95 % bei NW, 93 % bei



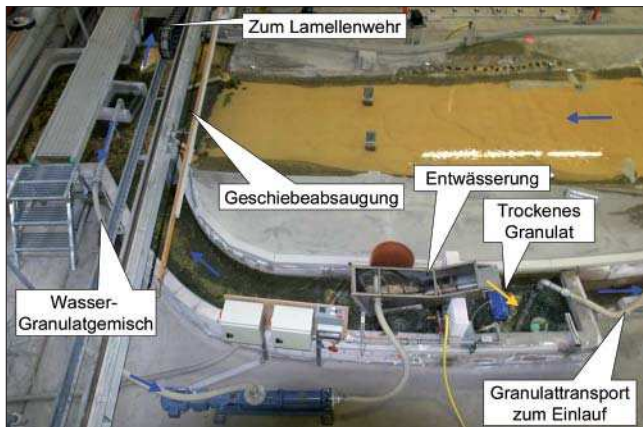


Bild 21: Auslaufbereich mit Geschiebesammler und -entwässerung

MW, 88 % bei 2 \* MW). Der Rest, der sich während des Versuchslaufs in einem nachgeschalteten Sieb sammelt, wird nicht sohnlah transportiert. Sein Volumen wird nach Versuchsende insgesamt bestimmt und über einen Korrekturfaktor dem gefangenen Geschiebeauftrag hinzugerechnet.

#### 4.5 Messbrücke

Eine automatisierte Messbrücke dient der Positionierung der Messgeräte. Die Messbrücke wird auf fest installierten Schienen über das Messareal verfahren (Bild 22). In der BAW sind zwei Systeme mit ähnlichem Funktionsumfang im Einsatz, die je etwa 3000 m<sup>2</sup> Laborfläche abdecken.



Bild 22: Übersicht Oder-Modell Hohenwutzen mit Messbrücke im Hintergrund

Ein zweiaxial bewegbarer Laser-Pointer, der durch die Messbrücke positioniert wird, dient der schnellen, genauen und reproduzierbaren Bestimmung von Lagekoordinaten beim Modellaufbau und bei Umbauten. Während das Einmessen eines großflächigen Modells mit vielen Geometriedetails in der Vergangenheit mit einem Tachymeter mehrere Tage in Anspruch nahm, erfolgt es nun mit der Messbrücke innerhalb weniger Stunden. Die reproduzierbare Positionsgenauigkeit des Systems liegt unter 2 mm.

In beide Fahrrichtungen sind Kameras für 2D-PTV-Messungen (Particle-Tracking-Velocimetry zur Messung der Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche) montiert. Im Innern der Brücke befindet sich ein photogrammetrisches Messsystem zur räumlichen und berührungslosen Vermessung der Modellsohle [Godding et al. 2003] und zur räumlichen Erfassung des Wasserspiegels und der Oberflächengeschwindigkeiten (3D-PTV), s. [Henning et al. 2007] in diesem Heft und [Hentschel 2007].

#### 4.6 Sohlaufnahmen

Das photogrammetrische System besteht aus einem Diaprojektor, der ein Raster auf die Modellsohle projiziert und drei hochauflösenden Videokameras, die das Raster aus drei Richtungen filmen (s. Bild 23) [Godding et al. 2003].

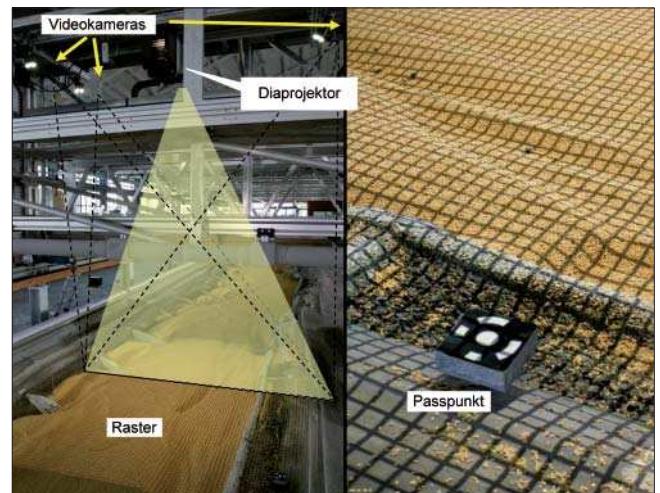


Bild 23: Innenansicht der Messbrücke mit Projektor und Kameras; an der Sohle das projizierte Raster

Die Kameras orientieren sich im Raum mit Hilfe von am Modell angebrachten Passpunkten. Diese sind genau eingemessen und lagestabil. Sie unterscheiden sich eindeutig durch einen kreisförmigen Code. Die aktive Orientierung der Kameras vor jeder Aufnahme gewährleistet die hohe Genauigkeit des Systems unabhängig von systembedingten Lageveränderungen der Kameras (z. B. Verformungen der gesamten Messbrücke durch Temperaturschwankungen).

Der Abstand der projizierten Rasterlinien wurde mit 2,5 cm als Kompromiss aus Messareal, Kameraauflösung, Rechnerkapazität und Bearbeitungszeit gewählt. Die Bestimmung von Lage und Höhe erfolgt jeweils an den Schnittpunkten der Rasterlinien. Bei einem Längenmaßstab von 1 : 100 beträgt damit bezogen auf die Natur der Datenabstand etwa 2,5 cm mal 2,5 cm, d. h. bei einem Modell mit einer Länge von 78 m und einer mittleren Breite von 2 m werden bei einer Überlappung der Messfelder > 50 % ca. 400.000 Koordinatentripel aufgenommen.

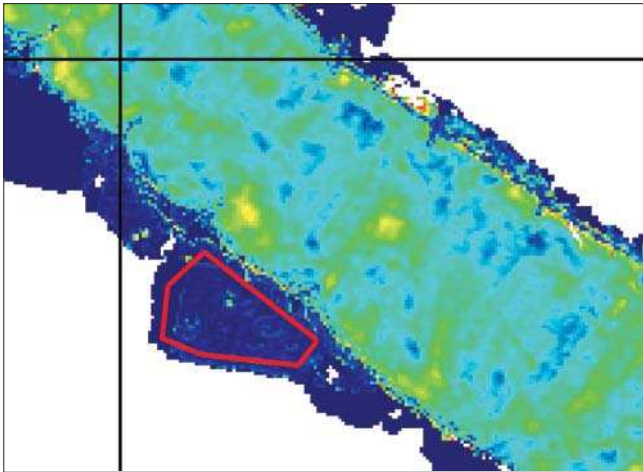


Bild 24: Sohlhöhen im Bereich eines Referenzfeldes (Beton)

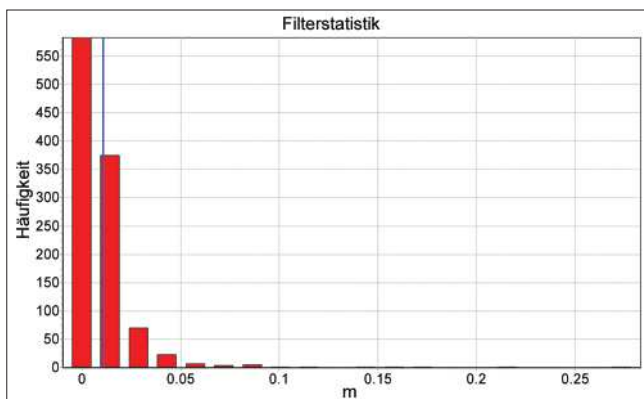


Bild 25: Streuung der Höhenfehler (Angaben in umgerechneten Naturhöhen) in der Referenzfläche aus 11 Sohlauflnahmen

Beim Einsatz des Systems war zu klären, wie reproduzierbar die Geometrievermessungen sind, und ob die Sohlstrukturen in der erforderlichen Feinheit aufgelöst werden können. Wesentlich ist bei dem Modellbetrieb, dass der Anfangszustand der Versuchsserien reproduzierbar auf einem Sollniveau ist, damit die Startbedingungen für jeden Versuchslauf gleich sind (s. Kap. 4.2). Die eingeebnete Sohle wird in zeitlich regelmäßigen Abständen und nach jedem Modellumbau vermessen und mit vorher aufgenommenen Sohlen verglichen.

Um die Messgenauigkeit des Systems nachzuweisen, befinden sich im Randbereich gekennzeichnete Flächen aus Beton, die bei jeder Sohlaufnahme mit vermessen werden (s. Bild 24). Bild 25 zeigt die Streuung der Höhen in diesen Referenzflächen über 11 zeitlich unabhängige Vermessungen. Die Systemgenauigkeit ist bei 94 % der Messungen besser als 2 cm in der Natur, entsprechend 0,5 mm im Modell. Der mittlere Fehler der Höhenmessung liegt bei 1 cm in der Natur, entsprechend 0,25 mm im Modell und damit deutlich unter der Korngröße des verwendeten Granulates mit einem  $d_m$  von 2,1 mm. Dieser Nachweis belegt die hohe Reproduktionsgenauigkeit des optischen berührungslosen Messsystems.

Bei dieser Art der Sohlvermessung ist zu beachten, dass mit einem Messraster von ca. 2,5 cm im Modell, entsprechend 2,5 m in der Natur gearbeitet wird. Strukturen, die in der Länge kleiner als 5 m sind, können somit nur unzureichend abgebildet werden, da dann für die Bild einer Struktur weniger als drei Messpunkte in Längsrichtung verfügbar sind. Strukturen mit Längen unter 2 m (Riffel) sind in einem derartigen Modell physikalisch nicht ähnlich abbildbar (Strukturhöhe in der Größenordnung des Modellkorndurchmessers). Die in dem hydraulischen Modell der Oder untersuchten und für die Schifffahrt relevanten Strukturen bestehen im Wesentlichen aus Transportkörpern mit einer Länge zwischen 30 m und 800 m, sodass diese mit hinreichender Genauigkeit vermessen werden können.

Bild 26 zeigt bei einer kleinen Düne (ca. 25 m Länge) die Mess- bzw. Interpolationsfehler, die durch die Rasterung der Geometrie auftreten können. Die Länge wird hier um ca. 1 m falsch gemessen, der Fehler in der Bestimmung der absoluten Höhe ist vernachlässigbar. Der größte Fehler entsteht bei der Bestimmung der vorderen Front der Sohlform. Deren Bestimmung ist jedoch für die für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung zu bearbeitenden Fragestellungen irrelevant. Für wissenschaftliche Fragestellungen, für die die genaue Form der Sohle von Interesse ist, wurde das Verfahren dahingehend erweitert, dass das Raster über der Sohle in

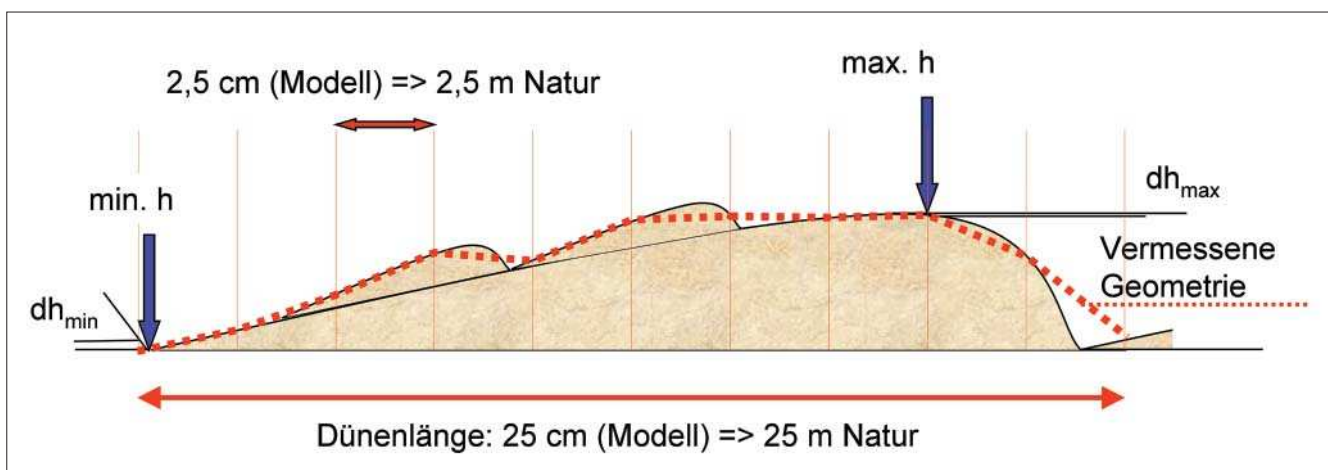


Bild 26: Messfehler durch Geometrierasterung



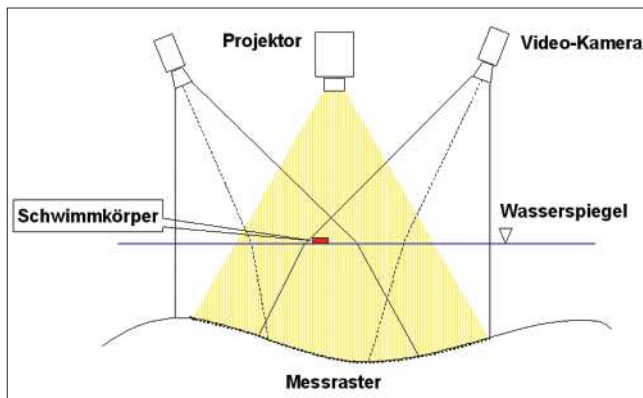


Bild 27: Sohlvermessung unter Wasser

Schritten von etwa 3 mm (Natur etwa 30 cm) in x- und y-Richtung verschoben wird, wodurch die Datendichte etwa um den Faktor 64 ansteigt. Zwischen zwei Messpunkten des Längsschnittes in der Bild 26 werden somit etwa sieben Zwischenpunkte vermessen, wodurch die Auflösung des Messsystems nahezu im Bereich der Korngröße liegt. Dieses Verfahren ist jedoch für die Routine-Messungen auf Grund der hohen Messzeit und der großen Datenmengen ungeeignet.

Das photogrammetrische Messsystem wurde in den letzten Jahren dahingehend erweitert, dass räumliche Messungen von Einzelpunkten möglich sind. Dadurch wurde es zum einen möglich, die Lage von auf dem Wasser schwimmenden Partikel im Raum zu bestimmen, wodurch Wasserspiegel und Oberflächengeschwindigkeiten erfasst werden können (3D-PTV, s. dazu den Beitrag von [Henning et al, 2007] in diesem Heft). Durch die Kenntnis der Höhe des Wasserspiegels zum Zeitpunkt der Messung können nun auch Sohlgeometrien durch den Wasserspiegel hindurch während eines laufenden Versuches vermessen werden (Bild 27).

Mit Hilfe eines Schwimmkörpers bekannter Dicke und Eintauchtiefe kann die Lage des Wasserspiegels bestimmt werden. Damit kann die Brechung des Lichtes am Wasserspiegel bei der Strahlverfolgung berücksichtigt werden. Diese Methode geht von folgenden Voraussetzungen aus:

- Der WSP stellt eine geometrische Ebene dar und liegt parallel zum Bezugshorizont.
- Der Schwimmkörper repräsentiert die Höhe des Wasserspiegels.
- Alle Kameras lösen zeitgleich aus und die Bilder werden zeitgleich gegrabt (hohe Anforderungen an die Hardware).

Daneben gibt es noch das Problem, dass Turbulenzen im Wasser den Kontrast verringern und den Strahlengang ablenken. Dadurch ist der räumliche Messbereich eingeschränkt und die Messgenauigkeit verringert sich.

Vergleichsmessungen im trockenen und im nassen Zustand zeigten, dass mit dieser Methode die Messgenauigkeit unter Wasser auf Grund der oben genannten Einschränkungen etwa um den Faktor 10 geringer ist, als bei Messungen ohne Wasser, d. h. wenn der mittlere Höhenfehler im trockenen Zustand bei etwa 0,25 mm liegt, liegt er unter Wasser bei etwa 2,5 mm (hier etwa 10 cm in der Natur).

Diese Methode ermöglicht in enger zeitlicher Folge Aufnahmen der Sohle während des Versuchsbetriebes. Bisher wurden im Modell der Oder bei Hohenwutzen die in Tabelle 2 dargestellten Messungen durchgeführt:

| Nr. | Messfeld |              | Messintervall |            | Aufnahmen | Messpositionen |
|-----|----------|--------------|---------------|------------|-----------|----------------|
|     | Modell   | Natur        | Modell        | Natur      |           |                |
| A   | 2 x 2 m  | 200 x 200 m  | 14 Sekunden   | 15 Stunden | 450       | 1              |
| B   | 9 x 2 m  | 900 x 200 m  | 3 Minuten     | 1 Woche    | 150       | 8              |
| C   | 30 x 2 m | 3000 x 200 m | 8 Minuten     | 3 Wochen   | 150       | 13             |

Tabelle 2: Im Modell der Oder bei Hohenwutzen durchgeführte Messungen

Die Messungen A wurden bei stationären Untersuchungen an einer einzelnen Messposition durchgeführt (450 Einzelmessungen über etwa zwei Stunden im Modell ohne das Messsystem zu bewegen). Sie ermöglichen eine präzise räumliche Vermessung von Transportkörperbewegungen. Die Messungen B und C wurden bei instationären Versuchen durchgeführt (Simulation einer Zeitreihe von zwei Jahren, 150 Einzelmessungen) und ermöglichen die Analyse abflussabhängiger Veränderungen der Sohlparameter (Messbereich bei Od-km 659,5; zum Beispiel mittlere Sohlhöhe und Standardabweichung der Sohlhöhe; s. Bild 28).

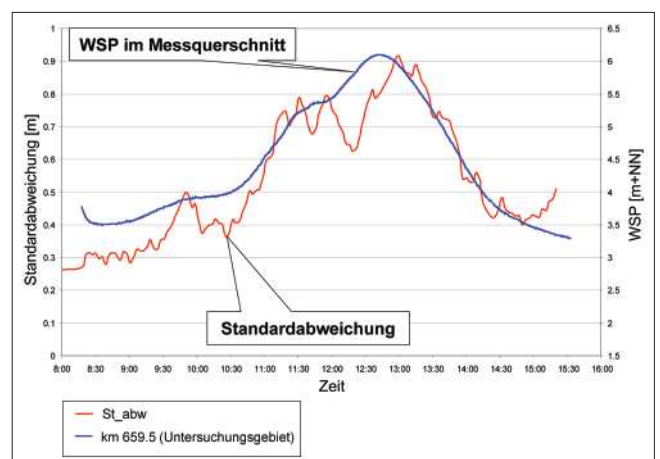


Bild 28: Instationärer Modellversuch; Standardabweichung der Sohlhöhe und Wasserspiegel als Funktion der Zeit

Bei den Messungen B und C musste für die Aufnahme eines größeren Areals das Messsystem bewegt werden. Bild 29 zeigt exemplarisch zwei Aufnahmen. Zwischen zwei Messungen benötigt die Traversierung und Orientierung etwa 30 Sekunden. Für den bei beiden Aufnahmen vermessenen Überlappungsbereich liegen somit Daten im Abstand von 30 Sekunden für den ex-

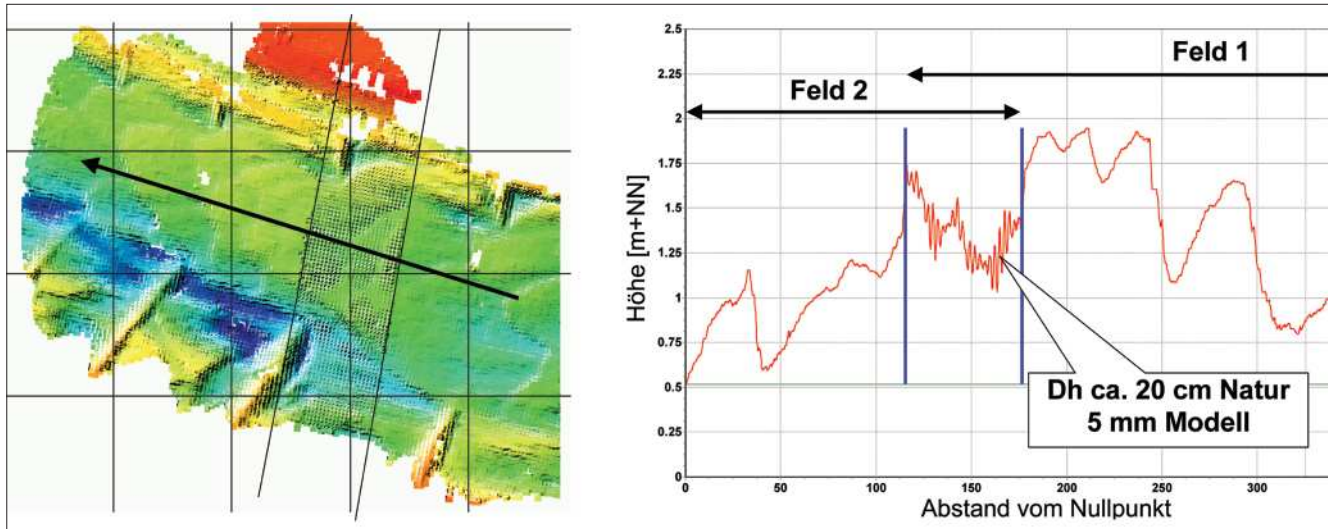


Bild 29: Zwei Sohlaufnahmen im Abstand von 30 Sekunden (in den Bildmitten jeweils der Überlappungsbereich von zwei Aufnahmefeldern)

akt gleichen Bereich vor. Da die Sohle sich während dieser Zeit verändert, lassen sich für diesen Bereich nur statistische Kennwerte (min/max/mittel der Sohlhöhe) analysieren. Die räumliche Auflösung von Sohlstrukturen ist hier reduziert. Mit Hilfe von Verfahren aus der geometrischen Datenauswertung (lokaler räumlicher Ausgleich) lassen sich allerdings auch diese Bereiche auswerten.

#### 4.7 Geschwindigkeitsmessungen

Es gibt unterschiedliche Methoden, um an hydraulischen Modellen Geschwindigkeiten zu messen. Bei Modellen mit beweglicher Sohle besteht bei Punktmessungen (z. B. LDA) das Hauptproblem darin, dass sich die Modellgeometrie während der Messung verändert, wenn für die Aufnahme an vielen Einzelpositionen ein längerer Zeitraum benötigt wird. Punktmessungen werden daher nur angewendet, um in kleinen Teilbereichen des Modells Geschwindigkeiten oder Abfluss-

anteile zu bestimmen (z. B. hinter Parallelwerken oder auf dem Vorland).

Bewährt haben sich flächige Messungen der Oberflächengeschwindigkeit (2D- oder 3D-PTV, s. Bild 30, [Henning et al. 2007] in diesem Heft und [DVWK 2003]). Bei diesen Verfahren werden Treibkörper auf der Wasseroberfläche von einer oder mehreren Videokameras verfolgt und über Passpunkte referenziert. Über eine hinreichend große Anzahl Treibkörper erhält man dabei ein geschlossenes Bild der Oberflächengeschwindigkeiten in einem Modell als Mittelwert über den Messzeitraum von in der Praxis etwa 1 bis 5 Minuten bei einem typischen Messfeld von ca. 4 m<sup>2</sup> bei der 3D-PTV und ca. 10 m<sup>2</sup> bei der 2D-PTV.

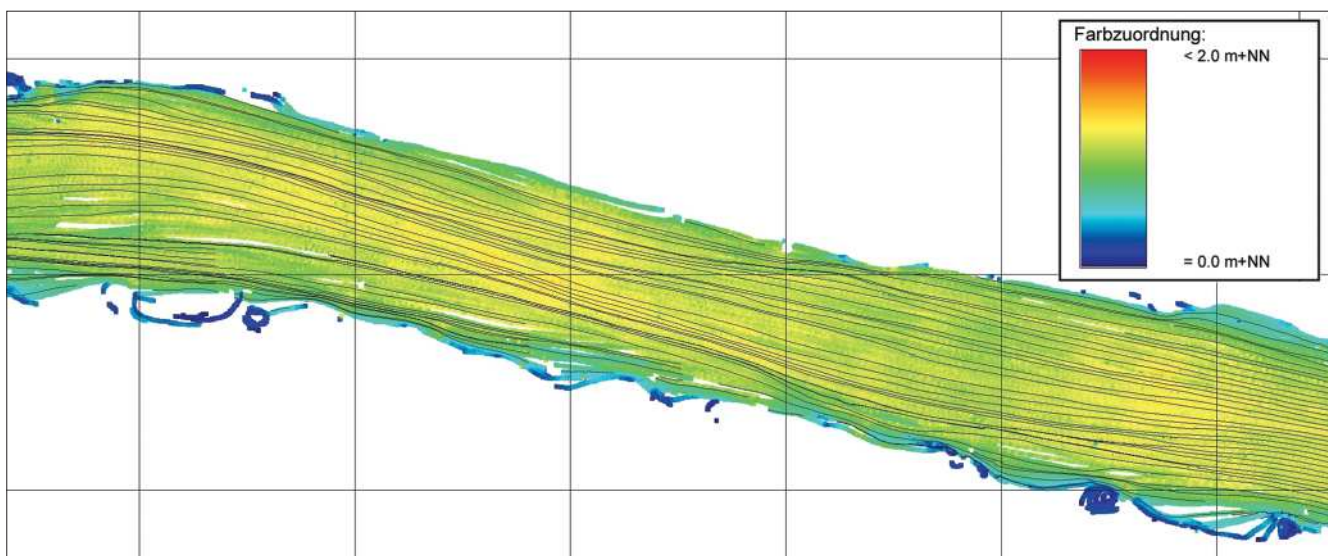


Bild 30: 2D-PTV, gemessene Oberflächengeschwindigkeiten und daraus berechnete Treibkörperbahnen

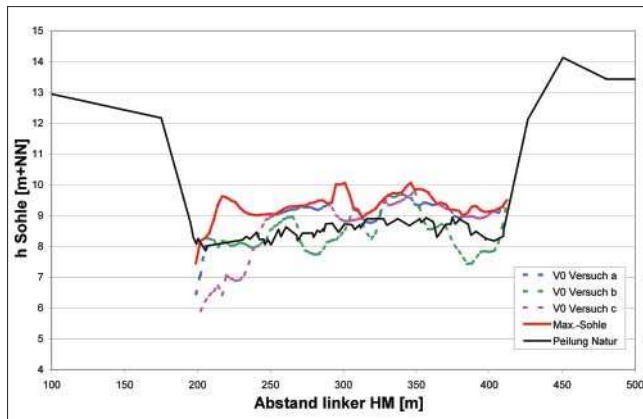


Bild 31: Modell- und Natursohlhöhen

## 5 Versuchsbetrieb, beispielhafte Analysen

### 5.1 Instationärer Geschiebetransport bei stationärem Abfluss

Bei stationären Untersuchungen (konstanter Abfluss) mit gleichen Rand- und Anfangsbedingungen stellt sich trotzdem ein instationärer Geschiebetransport ein. Bei stationärer Hydraulik können die Modelle gut genutzt werden, um mittlere Veränderungen von Sohle und Wasserspiegel einer Variante nach einer hinlänglich langen Versuchsdauer zu analysieren. Damit sind statistisch belastbare Variantenvergleiche dieser primären Kenngrößen möglich. Darüber hinaus ist es

durch den instationären Geschiebetransport möglich, auch die Dynamik dieser Größen über die Zeit zu erfassen. Bild 31 zeigt für eine Untersuchung an der Elbe im Modell gemessene Querprofile (in der Grafik als V0 bezeichnet) und eine Naturpeilung im gleichen Querprofil. Der Versuch "b" entspricht dabei relativ gut der Naturmessung, während die Versuche "a" und "c" zum Teil erheblich davon abweichen. Die Versuche zeigen somit die Dynamik der Flusssohle; jede einzelne Messung repräsentiert die Sohlstruktur nur zu einem konkreten Zeitpunkt. In den hydraulischen Modellen weisen die einzelnen Versuchsläufe bezüglich der Ausbildung der Sohlgeometrie eine ähnliche Streuung auf wie in der Natur. Diese Unterschiede in der Sohlgeometrie sind bei Prognoseuntersuchungen von großem Interesse, da sie zeigen, welche Sohldynamik bei der Umsetzung in der Natur zu erwarten wäre. Die in der Grafik dargestellte Linie "Max.-Sohle" zeigt die maximal an jeder Position auftretende Höhe der Sohle über alle Versuche in dem Modell und somit für jede Position im Querschnitt die minimal zu erwartende Wassertiefe in Abhängigkeit von unterschiedlichen Sohlformen, wie sie infolge der natürlichen morphologischen Dynamik auftreten.

Trotz gleicher Anfangs- und Randbedingungen verläuft jeder Versuch anders, sodass die beobachteten Sohlgeometrien, ähnlich wie in der Natur, mehr oder weniger zufällig sind. Nur die statistischen Summenparameter (mittlere Sohlhöhe, Standardabweichung etc.) sind zwischen den Versuchen weitgehend gleich. Das

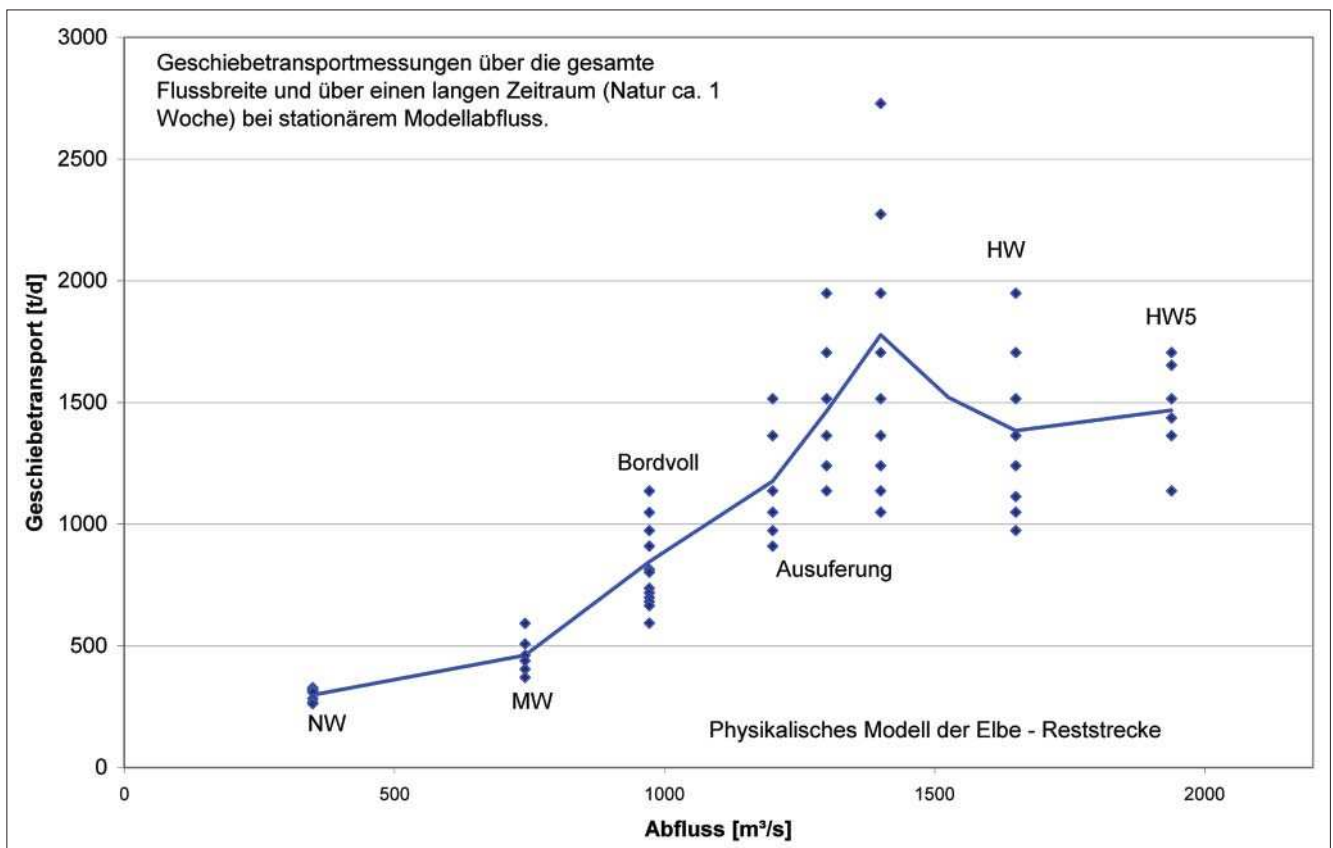


Bild 32: Variabilität des abflussabhängigen Geschiebetransportes bei stationärem Abfluss



resultiert daraus, dass Geschiebetransportvorgänge auch bei stationären Randbedingungen (Abfluss, Geschiebeeintrag in die Untersuchungsstrecke) instationär erfolgen. Das trifft insbesondere auf Strecken mit Dünenbildung zu. Bild 32 zeigt für Messungen an einem Modell der Elbe, dass bei stationären Randbedingungen die Geschiebetransportrate erheblich schwanken kann. Hier wurde der gesamte Geschiebeaustrag um unterstromigen Modellrand über die gesamte Flussbreite und über einen Zeitraum gemessen, der etwa einer Woche in der Natur entspricht. Bei diesen Idealbedingungen, die so in der Natur nie einzuhalten sind, variiert der Transport bei einem bordvollen Abfluss etwa um den Faktor 3.

Mit der Dynamik der Geschiebetransportrate ist in Strecken mit Dünenbildungen auch eine Dynamik des Wasserspiegels verbunden. Modellmessungen zeigten hier Veränderungen der Wasserstände beim Durchgang größerer Dünen im Bereich von bis zu 5 cm (Natur). Da eine derartige Schwankungsbreite auch für die Natur zu erwarten ist, sind Aussagen bezüglich der Wasserstände in alluvialen Flussstrecken maximal in dieser Größenordnung möglich (Fixierungen bei NW variieren durch die Transportkörperdynamik bei nahezu gleichem Abfluss in dieser Größenordnung).

## 5.2 Sohlformen bei instationärem Abfluss

Untersuchungen mit einer instationären Zuflusssteuerung mit Simulationszeiträumen von mehreren Jahren ermöglichen die Analyse von langfristigen Sohlentwicklungen und der Wechselwirkung von Abflussänderungen und der Sohlform.

Bild 33 zeigt exemplarisch die Wasserstands- und Sohlentwicklungen in einem Modellversuch über einen Zeitraum von etwa sieben Stunden im Modell (hydrologisch ca. 8 Monate, morphologisch ca. 21 Monate in der Natur) bei dem eine größere Baumaßnahme (Erhöhung und Vorstreckung von Buhnen) zu einer Eintiefung der mittleren Sohlhöhe führt. Der hier betrachtete Untersuchungsabschnitt liegt oberhalb einer Engstel-

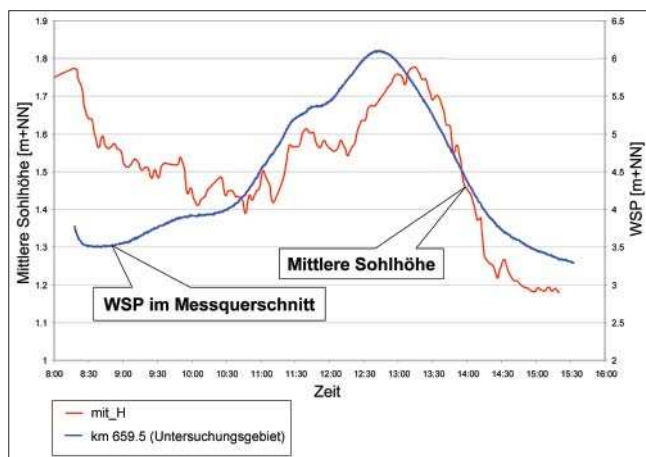


Bild 33: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe über die Zeit

le, wo es infolge des Rückstaus bei höheren Abflüssen zu Sedimentationen kommt. Im Mittel tieft sich hier die Sohle um etwa 60 cm ein, während des steigenden Astes der Abflusskurve kommt es jedoch zu einer Aufhöhung der Sohle. Bild 28 zeigt die Auswertung der Standardabweichung aus dem gleichen Versuchslauf. Das Bild zeigt, wie sich die Standardabweichung mit steigendem Abfluss erhöht, d. h. die relative Dünenhöhe nimmt deutlich zu, wie es auch in der Natur beobachtet werden kann. Dieses Phänomen wird derzeit in Kooperation mit der Universität Braunschweig mit dem Ziel der Verallgemeinerung vertieft untersucht [LWI 2005].

Die Entwicklung der Dünengeometrie folgt den Abflussveränderungen mit einer Verzögerung (Hysterese). Bild 34 zeigt zu diesem Versuch den Zusammenhang zwischen dem simultan aufgezeichneten Wasserspiegel und den Sohlformen (die blaue Linie zeigt einzelne Messwerte, die rote eine Ausgleichsfunktion) über die Zeit. Gut zu unterscheiden ist hier der ansteigende und der abfallende Ast der Kurve, d. h. bei gleichem Wasserstand hat die Sohle bei steigendem und bei fallendem Abfluss eine andere Form und damit auch eine andere Rauheit.

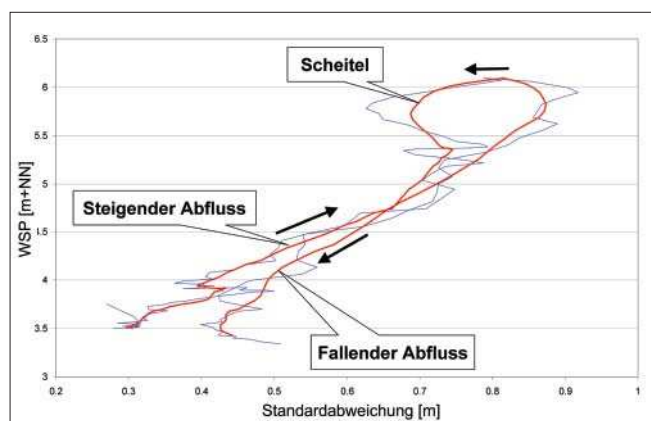


Bild 34: Standardabweichung als Funktion des Abflusses

Die Auswertung der Sohlhöhen und -formen bei instationären Untersuchungen ermöglicht eine umfangreiche Analyse der über die Zeit und den Abfluss nicht konstanten Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Untersuchungsvarianten (hier die Strömungsberandung in Form von Buhnen) und der Sohlgeometrie. Diese Phänomene sind in dieser Qualität erst durch jüngste Entwicklungen der Messtechnik beobachtbar geworden, sodass die wissenschaftliche Aufarbeitung der Ergebnisse noch aussteht [LWI 2005].

## 5.3 Trassierung der Fahrrinne bei beweglichem Flussbett

Der Nutzen einer Unterhaltungs- oder Ausbauvariante kann nicht immer direkt durch die ermittelten Veränderungen der Wasserstände oder der mittleren Sohlhöhen nachgewiesen werden. In Gewässern mit einer beweglichen Sohle muss die Veränderung der Form und

der Dynamik der Sohle bei der Beurteilung der Varianten berücksichtigt werden. In der Vergangenheit standen dafür keine standardisierten oder automatisierten Methoden zur Verfügung. Neue Methoden zur Berechnung der Fahrdynamik ermöglichen es jedoch, potenzielle Fahrrinnenverläufe aus den Geometriedaten zu berechnen. Dabei kann durch Vergleich mehrerer Versuche einer Serie mit gleichen Rand- und Anfangsbedingungen auch die Veränderlichkeit der Fahrrinne über die Zeit beurteilt werden.

Die in der BAW entwickelte Trassierungs-Software (PeTra - Pegelabhängige Trassierung, [BAW 2001d]) berücksichtigt die Flussgeometrie, die Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten sowie die nautischen Aspekte der gewählten Schiffstypen für die Analyse. Dabei wird zwischen Berg- und Talfahrern unterschieden. Begegnungs- und Überholverkehr kann berücksichtigt werden.

Bild 35 zeigt für einen Modellabschnitt der Oder bei Hohenwutzen den mit dem Programm PeTra errechneten idealen Verlauf der Fahrrinne für ein Europaschiff (Länge 82 m, Breite 11,40 m) aus fünf unabhängigen Modellversuchen mit gleichen Rand- und Anfangsbedin-

gungen bei einem mittleren Niedrigwasser für den heutigen Naturzustand (V0). Bild 36 zeigt demgegenüber den Verlauf der Fahrrinnen mit der größt möglichen Wassertiefe bei einer Untersuchungsvariante (hier wurden die Buhnen verändert, die Veränderungen der Geometrie sind in den Grafiken nicht sichtbar). Deutlich erkennbar sind die hohe Variabilität des Fahrrinnenverlaufes im Ausgangszustand und die Konstanz des Verlaufes bei der Variante. Insbesondere im Krümmungsbereich auf der linken Seite ist die Veränderung auffällig. Mit dieser Variante wird die Lagevariabilität der Fahrrinne deutlich eingeschränkt, wodurch der Verkehrssicherungsaufwand für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung erheblich reduziert würde [Hentschel 2007].

Die Bilder 35 und 36 zeigen jeweils einen Verlauf der Fahrrinne mit maximaler Tiefe. Sie zeigen jedoch nicht die dabei für die Schifffahrt nutzbare Wassertiefe. Diese liegt hier im Ist-Zustand (Variante V0) bei etwa 1,30 m unter MNW und bei der hier beschriebenen Buhnenvariante bei etwa 1,90 m unter MNW. Deutlich wird der Unterschied aus Bild 37. Diese zeigt für die Variante V0 einen optimierten Fahrrinnenverlauf mit einer nutzbaren Tiefe von 1,30 m unter MNW und für die



Bild 35: Fahrrinnen aus fünf unabhängigen Sohlgeometrien im Modell (V0)



Bild 36: Fahrrinnen bei einer Untersuchungsvariante (Buhnenvariante)



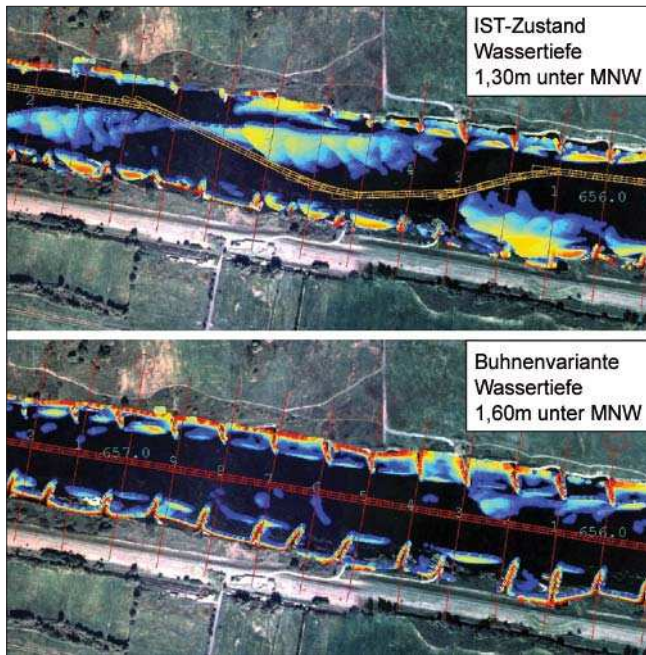


Bild 37: Trassierungsverläufe bei zwei Modellvarianten (PeTra)

hier untersuchte Buhnenvariante den Fahrrinnenverlauf für eine Tiefe von 1,60 m unter MNW. Gut erkennbar ist die unterschiedliche Qualität der Fahrrinnen. Im Ist-Zustand ist es dem Schiffsführer selbst mit einem erheblichen Peilaufwand nicht möglich, den optimalen Weg zu finden, während bei der Buhnenvariante die Trasse in der Mitte des Flusses verlaufen würde und somit ohne Probleme befahren werden könnte.

In einem hydraulischen Modell mit beweglicher Sohle kann die natürliche Dynamik einer alluvialen Flusssohle mit den entsprechenden Geschiebetransportvorgängen mit guter Ähnlichkeit untersucht werden. Damit sind detaillierte und stochastische Analysen der Wirksamkeit unterschiedlicher Stromregelungskonzepte hinsichtlich der Tiefe und Stabilität von nautisch nutzbaren Fahrrinnen möglich.

## 6 Kopplung von hydraulischen und numerischen Modellen

### 6.1 Vorbemerkung

Es ist die Regel, dass zu jedem aufwändigen hydraulischen Modell zur Vorbereitung und Begleitung numerische Modelle parallel betrieben werden. Je nach Aufgabenstellung und Komplexität können damit Varianten numerisch vor ausgewählt werden oder ergänzende Berechnungen durchgeführt werden (z. B. extreme Hochwasserereignisse).

Daneben gibt es aber auch direkte Kopplungen zwischen hydraulischen und numerischen Modellen, bei denen zum Beispiel variantenabhängige Veränderungen der Sohlform in den hydraulischen Modellen als geänderte Rauheitswerte in den numerischen Mo-

dellen Verwendung finden. Daneben können die Ergebnisse aus den hydraulischen Modellen auch für die Weiterentwicklung numerischer Verfahren verwendet werden.

### 6.2 Synergieeffekte

In hydraulischen Modellen mit beweglicher Sohle ist es schwierig oder unmöglich, ausgedehnte Gewässerabschnitte (> 10 Kilometer), sehr lange Zeiträume (Jahrzehnte) oder extreme Hochwasserereignisse zu untersuchen, sodass für diese Fragestellungen in jedem Fall mindestens ein numerisches Modell neben dem hydraulischen Modell betrieben wird. Numerische Modelle ohne hohen Detaillierungsgrad werden darüber hinaus für Voruntersuchung des Naturzustandes (Modellplanung) oder von Varianten verwendet.

An einem Untersuchungsabschnitt der Elbe (Elbe-Reststrecke, El-km 508 bis 521) [BAW 2001] wurde neben dem hydraulischen Geschiebetransportmodell (El-km 506,4 bis 512,4) ein hydraulisch-numerisches 1D-Feststofftransportmodell (1D-FTM; El-km 480 bis 536; 15 Jahre Simulationszeit) und ein hydraulisch-numerisches 2D Modell (2D-HN; El-km 505 bis 521 für Hochwasseruntersuchungen) betrieben. Während in dem 1D-FTM mittlere Veränderungen der Sohlhöhe berechnet werden konnten, handelte es sich bei dem 2D-Modell um ein Modell ohne Feststofftransport. Daraus ergaben sich folgende gegenseitige Ergänzungen und Plausibilisierungen zwischen dem hydraulischen und den numerischen Modellen:

- Vergleich der Ergebnisse der Sohlveränderungen aus dem hydraulischen Modell mit denen des 1D-FTM,
- Übernahme der Sohlveränderungen aus dem 1D-FTM in das 2D-HN,
- Berücksichtigung der im hydraulischen Modell ermittelten abflussabhängigen Sohlrauheiten im numerischen 2D-HN-Modell,
- Berücksichtigung der im hydraulischen Modell ermittelten geänderten Sohlrauheit in beiden numerischen Modellen.

Für das 2D-HN-Modell lagen für die Hochwasserkalibrierung keine ausreichenden Daten vor, um die Abflussaufteilung zwischen dem Flussschlauch und den Vorländern zu bestimmen. Daher wurde das Modell bei einem kleinen Abfluss im Flussschlauch kalibriert (Bestimmung der Sohlrauheit bei NW) und für die größeren Abflüsse wurden die veränderten abflussabhängigen Rauheiten über einen Faktor aus den im hydraulischen Modell gemessenen Sohlrauheiten (Standardabweichung der Sohlhöhe) bestimmt (s. Bild 38 und Bild 39). Die mit dieser Anpassung errechneten Wasserspiegel passten nun über das gesamte Abflussspektrum gut mit Naturmessungen überein.



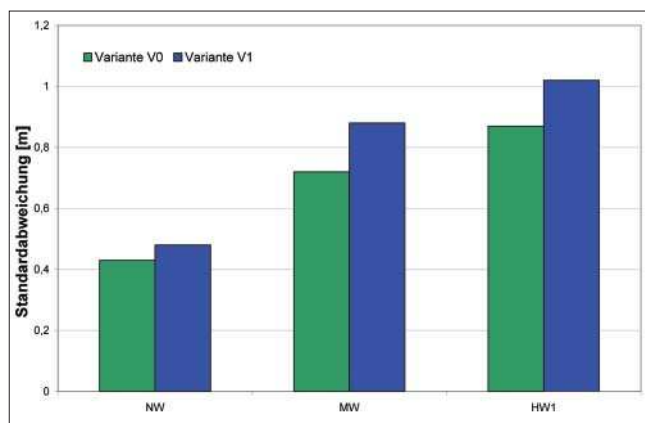


Bild 38: Varianten und abflussabhängige Sohlrauheit (mittlere Standardabweichung der Sohle über drei Versuche)

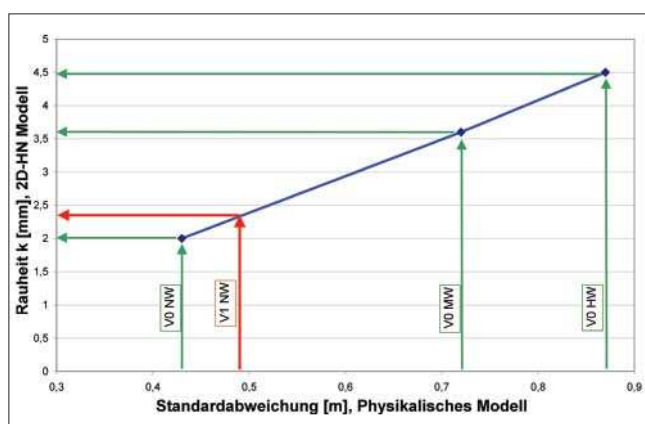


Bild 39: Rauheitswerte im hydraulischen und im numerischen Modell

Die veränderten Sohlrauheiten im hydraulischen Modell bei den Untersuchungsvarianten (Variante 1 mit einer deutlichen Veränderung der Buhngeometrie in Bild 38) wurden ebenfalls für die numerischen Berechnungen übernommen, sodass neben den Veränderungen der Geometrie auch die Veränderungen der Sohlrauheit berücksichtigt werden konnten. Bild 39 zeigt exemplarisch für einen Niedrigwasserabfluss, wie sich aus der geänderten Sohlstruktur im hydraulischen Modell eine Änderung des  $k$ -Wertes für das numerische Modell auf Grund der Variante (Veränderung der Strömungsberandung durch Buhnenänderungen) ergeben. Die lineare Abhängigkeit der Rauheit im numerischen Modell von der Standardabweichung im hydraulischen Modell basiert hier auf der Art der Kalibrierung des numerischen Modells, bei der diese Abhängigkeit vorausgesetzt wurde (s. oben). Hier liegt in jedem Fall noch weiterer Untersuchungsbedarf und an dieser Stelle soll nur aufgezeigt werden, welche prinzipiellen Möglichkeiten der Kopplung der unterschiedlichen Verfahren bestehen.

## 7 Ausblick

Bei der Lösung flussbaulicher Fragestellungen nehmen hydraulische Modellversuche mit beweglicher Sohle eine zentrale Rolle ein. Insbesondere durch erhebliche Fortschritte im Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik konnte der Anwendungsbereich und die Aussagetiefe der Modellversuche erheblich gesteigert werden. Dabei seien hier insbesondere die Prognostizierbarkeit von nautisch nutzbaren Fahrrinnenverläufen in geschiebeführenden Flüssen bei unterschiedlichen Unterhaltungs- oder Ausbauvarianten erwähnt.

Die bei den Modellen zur Anwendung kommenden Theorien der Ähnlichkeitsgesetze und des Geschiebetransportes beruhen zu einem großen Teil auf relativ spärlichen oder stark vereinfachten empirischen Natur- und Modelluntersuchungen aus dem letzten Jahrhundert. Insbesondere die in den aktuellen Modellen gewonnenen Daten zur Instationarität des Geschiebetransportes in so bisher nicht verfügbarer Qualität und Quantität verlangen eine vertiefte wissenschaftliche Aufbereitung und Verallgemeinerung. Hierbei arbeitet die Bundesanstalt für Wasserbau erfolgreich mit Universitäten zusammen. Schwerpunkte der künftigen gemeinsamen Forschung sollen in der grundlegenden Analyse von Geschiebetransportvorgängen, insbesondere von Dünen, aber auch in der Entwicklung besserer Modellgesetze für den Geschiebetransport zur Übertragung dieser komplexen Naturvorgänge in die Wasserbaulaboratorien liegen.

## 8 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

### Indizes

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| M | Modell                            |
| m | Mittelwert                        |
| N | Natur                             |
| r | Relation (Maßstab Natur / Modell) |
| s | Sediment                          |
| w | Wasser                            |

|   |  |                      |
|---|--|----------------------|
| d   | Dicke; Länge   | [m]                  |
| d <sub>ch</sub>   | charakteristischer Korndurchmesser                     | [m; mm]              |
| d <sub>m</sub>  | mittlerer Korndurchmesser                              | [m; mm]              |
| d <sub>r</sub>  | Maßstab der Korngröße                                  | [-]                  |
| D*  | sedimentologischer Korndurchmesser                     | [m; mm]              |
| $d_* = \left( \frac{\Delta \cdot g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_m$ |  |                      |
| Fr  | Froudezahl   | [-]                  |
|   | Verhältnis von Trägheits- zu Schwerekräften            |                      |
| Fr*   | Froudezahl der Kornes                                  | [-]                  |
|   | Verhältnis der treibenden zu den haltenden Kräften     |                      |
| $Fr_* = \frac{v_*^2}{\Delta \cdot g \cdot d_m}$                             |  |                      |
| h   | Wassertiefe  | [m]                  |
| H   | Dünenhöhe  | [m]                  |
| h <sub>r</sub>  | Maßstab der Höhen                                      | [-]                  |
| h <sub>r(TK)</sub>  | Höhenmaßstab der Sohlformen (Transportkörper)          | [-]                  |
| I <sub>e</sub>  | Energieliniengefälle                                   | [-]                  |
| L   | Dünenlänge   | [m]                  |
| L <sub>r</sub>  | Maßstab der Längen                                     | [-]                  |
| Q   | Abfluss  | [m <sup>3</sup> /s]  |
| Re  | Reynoldszahl   | [-]                  |
| Re  | Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften         |                      |
| Re*   | Reynoldszahl des Kornes                                | [-]                  |
| $Re_* = \frac{v_* \cdot d_m}{\nu}$  |  |                      |
| t <sub>r</sub>  | Zeitmaßstab  | [-]                  |
| t <sub>sr</sub>   | sedimentologischer Zeitmaßstab                         | [-]                  |
| t <sub>TKr</sub>  | Zeitmaßstab der Entwicklung von Dünen/Transportkörpern | [-]                  |
| T   | Temperatur   | [°C oder K]          |
| U   | Ungleichförmigkeit der Kornverteilung                  | [-]                  |
| $u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$   |  |                      |
| v   | Geschwindigkeiten                                      | [m/s]                |
| v*  | Schubspannungsgeschwindigkeit                          | [m/s]                |
| $v_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I_e}$  |  |                      |
| W   | Wasserstand am Pegel                                   | [cm]                 |
| ρ'  | spezifische Dichte                                     | [-]                  |
| $\rho' = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$                                    |  |                      |
| τ   | Schubspannung  | [N/m <sup>2</sup> ]  |
| ρ <sub>s</sub>  | Dichte des Sohlmaterials                               | [g/cm <sup>3</sup> ] |
| ρ <sub>w</sub>  | Dichte des Wassers                                     | [g/cm <sup>3</sup> ] |
| λ   | Verlustbeiwert   | [-]                  |
| ν   | kinematische Viskosität                                | [m <sup>2</sup> /s]  |

## 9 Literatur

- BAW 1994: Gutachten über Regelungsmaßnahmen in der Elbe-Reststrecke (Elbe-Kilometer 505 - 524) auf der Grundlage von Modelluntersuchungen: Teil 1: Voruntersuchungen für das physikalische Teilmodell (El-km 506-512)
- BAW 1997: Einfluss stärker motorisierter und längerer Schiffe auf die Sohlenerosion des Rheins; BAW 31.6355
- BAW 2001a: Gutachten über Regelungsmaßnahmen in der Elbe-Reststrecke (Elbe-Kilometer 505 - 524) auf der Grundlage von Modelluntersuchungen, Teil 4: Morphologische Untersuchungen im physikalischen Modell (Elbe - km 506,4 - 512,4)
- BAW 2001b: Untersuchungen zur Verbesserung der Hochwasserabfuhr in der Engstelle bei Hohenwutzen, Zwischenbericht September 2001, BAW-Nr.: 302-10044-00
- BAW 2001c: Oder Hohenwutzen, Untersuchung von Unterhaltungs- und Regelungsmaßnahmen, Teil 1: Voruntersuchung für das physikalische Modell, Gutachten, Karlsruhe 2001, BAW-Nr. 302.10038.00
- BAW 2001d: Tätigkeitsbericht der BAW 2001; FuE-Projekte Wasserbau im Binnenbereich, Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen unter Beachtung hydrodynamischer, fahrdynamischer und morphodynamischer Kriterien
- BAW 2004: Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen in Binnenwasserstraßen; Mitteilungen der BAW, Nr. 87, 2004
- DORER 1984: Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellen; in Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Heft 54
- DVWK 1988: Feststofftransport in Fließgewässern, Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis, Schriften Heft 87, Verlag Paul Parey
- DVWK 2003: Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. ATV-DVWK Arbeitsbericht, Arbeitsgruppe WW-2.4 „Feststofftransportmodelle“, März 2003
- ETTNER 2004: Untersuchungen zu Kolkvorgängen hinter dem unterströmten Schütz, Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen der TU Carola-Wilhelmina zu Braunschweig, 2004
- ETTNER 2007: Physikalische Modellierung von Kolkprozessen, Mitteilungsblatt Nr. 90 der BAW, 2007
- FAULHABER 2007: Neue Methoden der aerodynamischen Modellierung flussbaulicher Fragestellungen; Mitteilungsblatt Nr. 90 der BAW, 2007
- FÜHRBÖTER 1980: Strombänke (Großriffel) und Dünen als Stabilisierungsformen; Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau, TU Braunschweig, Heft 67
- GLAZIK 1964: Veränderungen der Wasserspiegel- und Sohlenlage der Oder. Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 14, H.11, 1964, Berlin
- GODDING; HENTSCHEL; KAUPPERT 2003: Videometrie im wasserbaulichen Versuchswesen; Wasserwirtschaft, Wassertechnik; 4/200
- HENNING; SAHRHAGE; HENTSCHEL 2007: 3D-PTV – Ein System zur optischen Vermessung von Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in physikalischen Modellen, Mitteilungsblatt Nr. 90 der BAW, 2007
- HENTSCHEL 2006: Physikalisches Geschiebetransportmodell der Oder zur Untersuchung der Wechselwirkung von Stromregelungsbauwerken, Sohlformen und nautischen Bedingungen; Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen; Heft 32
- HENTSCHEL; WITTE 1999: Morphologische Untersuchungen zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse zwischen Dömitz und Hitzacker, HTG-Kongress 1999, Magdeburg
- JÄGGI 1983: Alternierende Kiesbänke; Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie and ETH Zürich; Nr. 62; Zürich
- KOBUS 1984: Wasserbauliches Versuchswesen; Verlag Paul Parey, 2. Auflage
- LWI 2005: Auswertung sedimentologischer Daten an der Oder - Machbarkeitsstudie; Leichtweiss-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, Bericht 911, September 2005
- SCHANKAT 2006: Literaturstudie zu morphologischen Rinnenversuchen, Technischer Bericht Nr. 06/2006 des Lehrstuhles für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft, Universität Stuttgart im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau; 28.04.2006
- SCHRÖDER 1994: Technische Hydraulik, Kompendium für Wasserbau, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- ZANKE 1982: Grundlage der Sedimentbewegung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York